

# Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

## **CFRP, la frontiera più avanzata nel settore del restauro e dell'adeguamento statico di opere infrastrutturali quali i ponti**

Relatore

Prof.ssa Ing. Cecilia Surace

Relatore esterno

Ing. Paolo Ruggieri

Candidata

Luz Elizabeth Vasquez Munoz

Anno Accademico 2016/2017





*al mio Signore Gesù Cristo,  
che non ho mai smesso d'amare*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	9
<b>CAPITOLO 1: I COMPOSITI FRP</b> .....	11
<b>1.1 Materie prime dell'FRP</b> .....	12
<b>1.2 Tessuti in FRP</b> .....	12
1.2.1 Parametri caratteristici dei tessuti .....	16
1.2.2 Applicazione dei tessuti in FRP.....	17
<b>1.3 I manufatti pultrusi in FRP</b> .....	24
1.3.1 Il rinforzo delle strutture mediante incollaggio di lamine pultruse.....	27
<b>CAPITOLO 2: I COMPOSITI CFRP</b> .....	29
<b>2.1 Proprietà meccaniche dei compositi FRP</b> .....	29
2.1.1 Confronto tra le caratteristiche meccaniche di un laminato preformato e di un tessuto unidirezionale impregnato in situ .....	33
<b>2.2 Fibre usate per la produzione di materiali compositi FRP</b> .....	34
2.2.1 Fibre di Vetro .....	35
2.2.2 Fibre di Carbonio.....	35
2.2.3 Fibre aramidiche .....	38
<b>CAPITOLO 3: STRESSHEAD-CARBOSTRESS POST-TENSIONING SYSTEM</b> .....	39
<b>3.1 Descrizione dell'innovativo sistema di rinforzo</b> .....	39
3.1.1 Caratteristiche delle componenti dello StressHead-CarboStress post-tensioning system	40
<b>3.2 I vantaggi delle lamine pretese pultruse in fibra di carbonio</b> .....	41
<b>3.3 Processo d'installazione del sistema di rinforzo</b> .....	41
3.3.1 Preparazione preventiva del substrato .....	42
3.3.2 Messa in opera del sistema di rinforzo .....	43
<b>3.4 Protezione del sistema di rinforzo</b> .....	46
<b>3.5 Controllo e monitoraggio dell'intervento di rinforzo</b> .....	47
3.5.1 Controllo dell'intervento di rinforzo.....	48
3.5.2 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo.....	51

<b>CAPITOLO 4: RESTAURO E ADEGUAMENTO STATICO DI UN PONTE CON STRESSHEAD-CARBOSTRESS POST-TENSIONING SYSTEM</b> .....	52
<b>4.1 Caratteristiche del ponte</b> .....	52
<b>4.2 Campagna di indagini e di prove</b> .....	54
4.2.1 Saggi esplorativi .....	54
4.2.2 Indagini radar.....	59
4.2.3 Prove per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo .....	61
<b>4.3 Caratterizzazione meccanica della trave danneggiata</b> .....	64
<b>4.4 Modellazione del ponte agli elementi finiti</b> .....	65
4.4.1 Azioni agenti sull'impalcato.....	66
4.4.2 Combinazioni delle azioni .....	67
4.4.3 Modellazione della trave a cassone nella situazione originaria progettuale .....	69
4.4.4 Modellazione della trave a cassone nella situazione attuale di danneggiamento.....	79
<b>4.5 SISTEMA DI RINFORZO</b> .....	81
4.5.1 Dimensionamento del rinforzo .....	82
4.5.2 Modellazione della trave a cassone nella situazione futura di restauro .....	85
<b>CAPITOLO 5: VERIFICHE STRUTTURALI</b> .....	89
<b>5.1 Output dell'analisi strutturale del modello della trave con i 28 cavi integri</b> .....	89
5.1.1 Verifiche allo SLU.....	89
5.1.2 Verifiche allo SLE.....	92
<b>5.2 Output dell'analisi strutturale del modello della trave con i 26 cavi</b> .....	105
5.2.1 Verifiche allo SLU.....	106
5.2.2 Verifiche allo SLE.....	107
<b>5.3 Output dell'analisi strutturale del modello della trave nella situazione futura di restauro</b> .....	116
5.3.1 Verifiche allo SLE.....	116
5.3.2 Verifiche allo SLU.....	118
<b>CAPITOLO 6: VALUTAZIONE ECONOMICA</b> .....	129
<b>CONCLUSIONI</b> .....	131
<b>ALLEGATI</b> .....	133
Allegato A – Traffic Line Lanes .....	133

Allegato B – I tracciati dei 28 cavi di precompressione.....	134
Allegato C – Tendon Prestress Load.....	149
Allegato D – Construction Stages del modello della trave con i 28 cavi .....	150
Allegato E – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i 28 cavi di precompressione nella Combinazione Quasi Permanente.....	154
Allegato F – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i 28 cavi di precompressione nella Combinazione Caratteristica .....	155
Allegato G – Construction Stages del modello della trave con i 26 cavi .....	156
Allegato H – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in assenza dei cavi 11d e 11s nella Combinazione Quasi Permanente .....	159
Allegato I – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in assenza dei cavi 11d e 3s nella Combinazione Quasi Permanente .....	160
Allegato J – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in assenza dei cavi 11d e 3d nella Combinazione Quasi Permanente .....	161
Allegato K – Un riferimento dello StressHead-CarboStress post-tensioning system: Il Ponte Sandacher .....	162
Allegato L – I 18 tracciati delle lastre pultruse CFRP.....	163
Allegato M – Tendon Prestress Load nella situazione futura di restauro.....	172
Allegato N – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i 18 cavi di precompressione esterna nella Combinazione Quasi Permanente .....	173
Allegato O – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave di futuro restauro nella fase di costruzione al momento dell'applicazione del sistema di rinforzo .....	174
Allegato P – Computo metrico estimativo di massima .....	175
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>185</b>



## INTRODUZIONE

I ponti fin dall'antichità hanno costituito una necessità fisica per collegare diverse comunità e tutt'ora costituiscono l'accesso primordiale a molti paesi nel mondo. La loro funzione è sempre di grande importanza perché essi creano un'unione fisica tra due zone inizialmente separate a causa dell'orografia del terreno (valli o mari) o a causa di precedenti eventi che hanno causato dissesti. Il collegamento tra due territori consente la condivisione culturale, lo scambio economico ed un accesso sempre aperto al trasporto.

Se i tanti ponti esistenti fossero chiusi e le uniche vie di comunicazioni tra le diverse nazioni del mondo fossero quelle marittime ed aeree, si avrebbero sicuramente enormi svantaggi economici.

Molti ponti attualmente esistenti sono strutture che hanno già concluso la loro vita utile, per la quale furono progettate, e che si trovano ora in condizioni di ammaloramento a causa del degrado subito nel tempo. Molte di queste opere sono da monitorare e da recuperare in caso di danneggiamento, in modo da riportarle allo stato di servizio ottimale. Alcune volte la causa dei danneggiamenti sui ponti non è dovuta al solo degrado nel tempo dei materiali che li costituiscono. Gli impatti violenti e improvvisi di forze esterne sulla struttura causano spesso il tranciamento delle armature interne alla trave, con la mancanza delle quali i carichi di progetto non vengono più sopportati con i dovuti coefficienti di sicurezza e le travi da ponte possono anche raggiungere il collasso. Inoltre ci sono ponti che essendo stati progettati con le normative vigenti all'epoca della loro costruzione, pur essendo in condizioni ottimali di servizio, devono essere adeguati alle nuove normative vigenti, dovendo essere spesso in grado di reggere più carico di quello per cui sono stati precedentemente progettati.

E' importante, pertanto, che il recupero e l'adeguamento dei ponti esistenti avvenga nel più breve periodo, considerata la loro fondamentale funzione che svolgono tra le comunità, di cui si è detto sopra.

Molte sono le soluzioni che si utilizzano per il recupero e l'adeguamento di un ponte. Bisogna però sempre puntare all'efficacia dell'intervento e alla sua convenienza

economica, valutandola in base al ciclo di vita atteso per la struttura. Una soluzione all'avanguardia che soddisfa tali requisiti, relativamente facile da operare e con tempi brevi di esecuzione, è l'intervento di rinforzo di travi da ponte con polimeri rinforzati da fibre di carbonio.

## CAPITOLO 1:

### I COMPOSITI FRP

L'utilizzo di materiali compositi FRP (*FiberReinforcedPolymer*) nell'Ingegneria Civile copre ormai da anni, come noto, una vasta serie di applicazioni specie nell'ambito degli interventi finalizzati al recupero della capacità portante delle strutture in cemento armato, normale e precompresso, consentendo di ripristinare o incrementare la resistenza con un sistema costruttivo affidabile, di semplice esecuzione e non invasivo.

L'impiego dell'FRP in edilizia riguarda solo in minima parte gli edifici e le infrastrutture di nuova costruzione dove i materiali da costruzione più impiegati sono ancora quelli tradizionali come il calcestruzzo, l'acciaio e il legno, peraltro decisamente più economici. L'utilizzo prevalente dell'FRP nelle costruzioni riguarda il settore del restauro statico delle strutture degradate o danneggiate e quello dell'adeguamento statico, in particolare in campo sismico.

I compositi FRP vengono applicati come rinforzo interno e/o rinforzo vincolato esternamente. Per il rinforzo interno del cemento armato, le forme più frequenti di FRP sono barre, lisce e corrugate, e cavi di precompressione simili a quelli costituiti da barre d'acciaio e trefoli. Lamine, gusci e fogli di tessuto sono, invece, utilizzati per il rinforzo esterno del calcestruzzo.

I rinforzi FRP sono attualmente commercializzati sotto forma di sistemi costituiti dal prodotto FRP e dalle resine ed altri sistemi di fissaggio al calcestruzzo

Un intervento di ripristino basato sull'utilizzo di materiali compositi ad alte prestazioni come l'FRP, nonostante il costo più elevato delle materie prime rispetto ai materiali da costruzione tradizionali, può risultare più economico se si estende la valutazione economica ai tempi e alle attrezzature necessarie per l'intervento, ai costi derivanti da eventuali interruzioni dell'esercizio della struttura e alla stima della vita utile della struttura stessa a seguito dell'intervento secondo il criterio del *Life Cycle Cost*.

## 1.1 Materie prime dell'FRP

La matrice polimerica dell'FRP è prevalentemente formata da una *resina epossidica* e più raramente da *poliestere*. Le fibre impiegate per il rinforzo della matrice polimerica sono in *carbonio* o in *aramide* o in *vetro* e più raramente in *boro*.

Le fibre, prima del loro impiego nel restauro, vengono trasformate, tramite processi industriali, in tessuti o pultrusi come è descritto rispettivamente nei seguenti paragrafi.

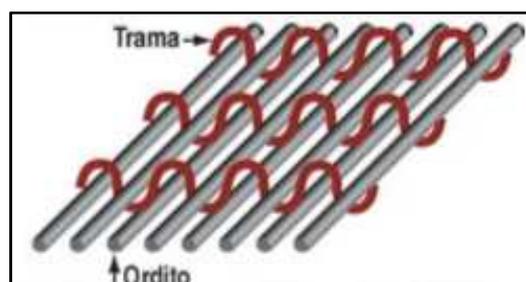
## 1.2 Tessuti in FRP

La forma più diffusa di rinforzo nell'FRP impiegato nel settore delle costruzioni è basata sull'impregnazione in opera con resine epossidiche di tessuti prodotti con le fibre. I tessuti vengono realizzati per mezzo di telai analoghi a quelli utilizzati nella realizzazione dei prodotti tessili tradizionali e possono essere prodotti secondo una vasta gamma di configurazioni e caratteristiche a seconda dei materiali utilizzati e della disposizione che assumono nel piano del tessuto i vari fasci di fibre.

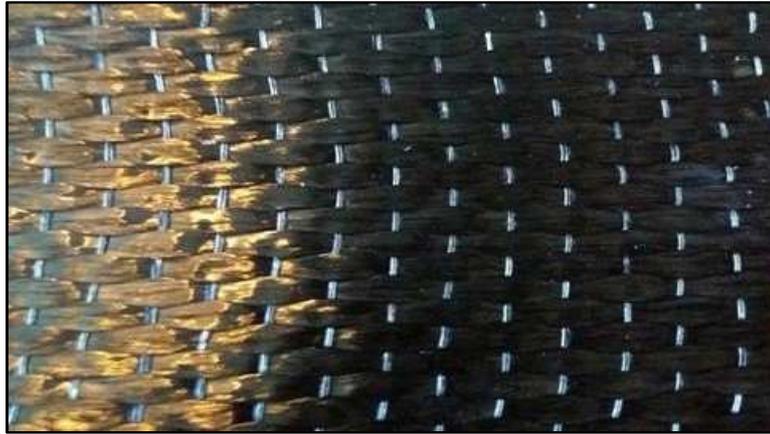
Dal punto di vista della configurazione geometrica si può fare la distinzione in:

- tessuti monoassiali;
- tessuti biassiali;
- tessuti multiassiali.

I *tessuti monoassiali* sono costituiti da fibre o fasci di fibre disposte tutte parallelamente (ordito) e tenute assieme da una trama di filamenti che possono essere dello stesso materiale delle fibre dell'ordito o, più spesso, da un materiale diverso - per esempio il nylon o il poliestere - come è mostrato nella seguente Figura.

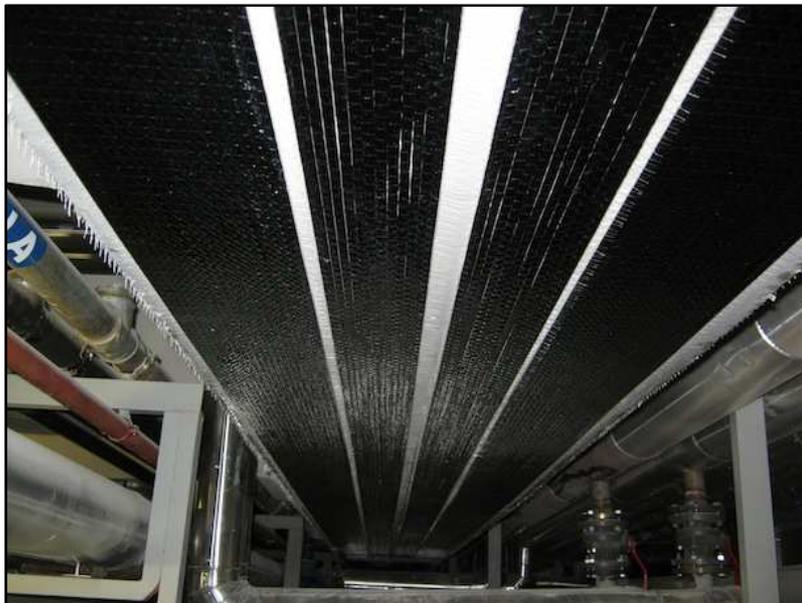


**Figura 1.2.1 : Tessuto monoassiale**



*Figura 1.2.2 : Tessuto monoassiale*

Nelle tecniche di rinforzo strutturale per incollaggio all'esterno di fibre ad alta resistenza, i tessuti monoassiali trovano impiego in tutti i casi in cui è noto a priori l'andamento delle linee isostatiche di trazione, ossia delle tensioni principali di trazione. In questo caso, ovviamente, i tessuti vengono posti in opera disponendo le fibre dell'ordito nella direzione del massimo sforzo di trazione. Esempio tipico è il rinforzo a flessione delle travi o delle solette mediante applicazione all'intradosso di tessuti monoassiali con fibre dirette lungo l'asse delle travi o delle solette.



*Figura 1.2.3 : Rinforzo a flessione di una trave*

Nei casi in cui non è nota a priori la direzione delle sollecitazioni massime di trazione oppure quando questa può variare lungo l'elemento da rinforzare o in funzione dei carichi esterni applicati, oppure, quando nello stato tensionale della struttura da rinforzare esistono due direzioni principali di trazione, si potrà comunque procedere al rinforzo utilizzando tessuti di tipo monoassiale, avendo, però, l'accortezza di disporre più strati di tessuto orientati secondo le diverse direzioni.

I *tessuti biassiali* vengono ottenuti intrecciando fasci di fibre secondo due direzioni ortogonali. Possono essere realizzati utilizzando sia fibre dello stesso tipo nelle due direzioni che fibre di natura diversa (ad esempio, carbonio in una direzione ed aramide nell'altra). In questo ultimo caso il tessuto viene definito "ibrido". Un tessuto biassiale costituito nelle due direzioni dallo stesso tipo e dalla stessa grammatura (peso per metro quadro) di fibre, viene definito "bilanciato". I tessuti ibridi trovano applicazione nella realizzazione di manufatti in composito dove, nelle due direzioni ortogonali, sono richieste prestazioni meccaniche sostanzialmente diverse. Tuttavia, questi tessuti non trovano alcuna applicazione pratica nel settore delle costruzioni civili.

I tessuti biassiali, se sono caratterizzati da maglie sufficientemente compatte e ravvicinate, possono essere confezionati senza l'ausilio di filamenti di supporto in quanto i due fasci di fibre ortogonali si intrecciano e si mantengono reciprocamente. Tuttavia, nella realizzazione di tessuti biassiali da utilizzare per impregnazione in situ, si tende a mantenere distanti tra loro i singoli fasci di fibre in modo da lasciare ampi vuoti e consentire una più facile penetrazione della resina all'interno del tessuto. Per mantenere inalterata l'inclinazione e la distanza reciproca tra i fasci di fibre del tessuto ed evitare perdite di fibre, si introduce una fitta "legatura" (knitting) ottenuta utilizzando, ad esempio, dei filati acrilici o in poliestere

I *tessuti multiassiali* vengono ottenuti, mediante speciali tecniche di tessitura, disponendo le fibre secondo più direzioni tra di loro variamente inclinate. In commercio esistono tessuti triassiali, con fasci di fibre intessuti lungo tre direzioni inclinate di  $120^\circ$  l'una rispetto all'altra, e tessuti quadriassiali caratterizzati dalla presenza di quattro diversi ordini di fibre inclinati di  $135^\circ$  l'uno rispetto all'altro.

La realizzazione pratica dei tessuti multiassiali comporta, necessariamente, l'utilizzo di filamenti di knitting che servono a "cucire" e a far stare insieme i vari fasci di fibre

i quali risultano, per lo più, sovrapposti l'uno all'altro senza essere intrecciati, come è mostrato nella Figura che segue.



***Figura 1.2.4 : Tessuto quadriassiale in fibra di carbonio***

Nel settore del rinforzo strutturale i tessuti multiassiali trovano impiego laddove la direzione delle tensioni di trazione non è nota o può variare in funzione dei carichi esterni. Esempi di utilizzo sono: il rinforzo a taglio delle travi inflesse, dove l'inclinazione dei probabili piani di frattura non è più di  $45^\circ$ , come nel caso delle travi in C.A. ma varia in funzione di diversi parametri, o il rinforzo di superfici murarie o voltate, dove l'esatto andamento degli sforzi spesso non è di agevole determinazione. Un'altra applicazione è costituita dagli interventi di incremento locale della duttilità dei nodi trave-pilastro tramite fasciatura di confinamento eseguita con tali tessuti al fine di migliorare la risposta strutturale alle azioni sismiche cicliche. Nei casi di cui sopra, l'applicazione di un tessuto caratterizzato da una distribuzione di fibre secondo più direzioni nel piano, consente di riprendere le tensioni di trazione che si sviluppano nella struttura da rinforzare qualunque sia l'andamento delle loro curve d'involuppo.

### 1.2.1 Parametri caratteristici dei tessuti

Oltre al tipo ed alla disposizione delle fibre esistono ulteriori parametri che caratterizzano un tessuto e che è necessario conoscere per progettare un rinforzo strutturale in FRP. Essi sono:

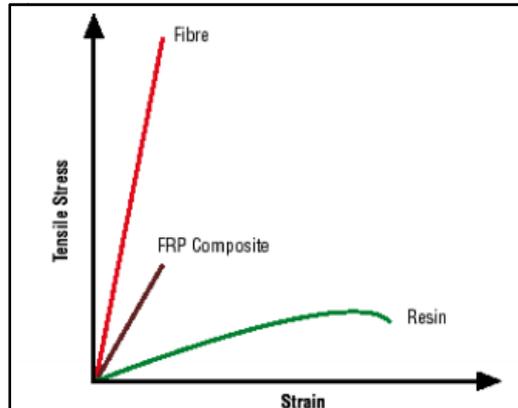
- grammatura ( $\text{g/m}^2$ );
- larghezza (mm, cm, m);
- sezione resistente unitaria ( $\text{mm}^2/\text{m}$ );
- resistenza a trazione (MPa);
- modulo elastico (MPa);
- allungamento a rottura (%).

La *grammatura* è il peso, espresso in grammi, di un metro quadro di tessuto e costituisce una indicazione del quantitativo complessivo di fibra presente nel tessuto.

La *larghezza* è la dimensione del tessuto trasversale alla direzione lungo la quale esso risulta arrotolato. I produttori di tessuti tendono a produrre, per uno stesso tipo di tessuto, varie larghezze commerciali. Per quanto attiene ai tessuti monoassiali che vengono utilizzati per il rinforzo strutturale, le larghezze commerciali più diffuse sono 20 cm, 30 cm e 50 cm. Per i tessuti multiassiali, in genere, si utilizzano larghezze maggiori per consentire un sufficiente sviluppo alle fibre poste in direzione inclinata rispetto alla lunghezza.

La *sezione resistente unitaria* è la sezione complessiva delle fibre di un tessuto aventi una determinata direzione, riferita all'unità di larghezza. E' un parametro che viene calcolato dividendo il peso in grammi delle fibre di un tessuto disposte lungo una certa direzione, per il peso specifico assoluto del materiale di cui è costituito il tessuto. A titolo d'esempio, in un tessuto monoassiale da  $300 \text{ g/m}^2$  in fibra di carbonio, tenuto conto che il peso specifico del carbonio è di circa  $1,8 \text{ g/cm}^3 = 1,8 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ , la sezione resistente unitaria nella direzione (unica) di tessitura delle fibre è data da:  $300/(1,8 \times 10^6) = 1,66 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

Se si sottopone un campione di tessuto costituito da carbonio, aramide o vetro ad una prova di trazione diretta fino a portarlo alla rottura, si ottiene un diagramma del tipo di quello riportato nella Figura che segue.



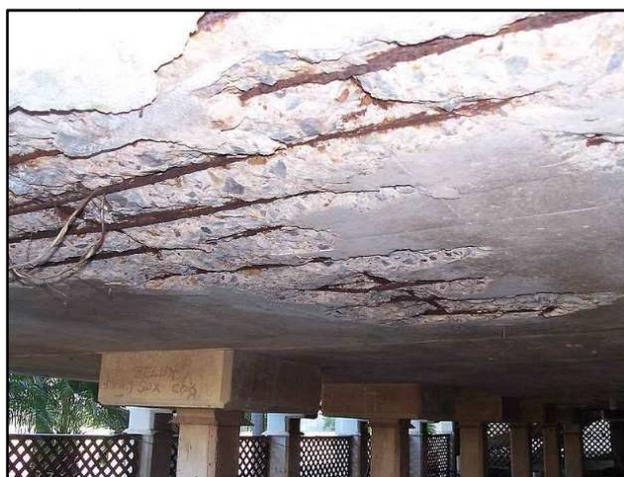
**Figura 1.2.5 : Tipico diagramma d'allungamento in funzione dello sforzo di trazione**

Il comportamento meccanico di un tessuto è completamente definito dai seguenti parametri:

- resistenza meccanica a trazione ( $f_{rt}$ ), definita come l'ordinata dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto;
- allungamento a rottura ( $\epsilon_u$ ), definita come l'ascissa dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto;
- modulo elastico a trazione ( $E_t$ ), definito come la tangente dell'angolo compreso tra suddetto segmento e l'asse delle deformazioni.

### 1.2.2 Applicazione dei tessuti in FRP

La prima operazione da affrontare è la verifica della consistenza del supporto su cui si deve effettuare l'applicazione dei tessuti. Occorre considerare, infatti, che gli sforzi di trazione portati dal rinforzo vengono trasferiti alla struttura rinforzata attraverso sforzi di taglio trasmessi dalla resina utilizzata per l'incollaggio alla superficie in calcestruzzo. Se quest'ultima non è in grado di sopportare suddetti sforzi di taglio, si verificheranno collassi per *peeling* (termine inglese che indica il fenomeno di distacco del copriferro).



**Figura 1.2.6 : Peeling**

Nel caso in cui la superficie su cui applicare i rinforzi sia giudicata meccanicamente idonea a trasmettere gli sforzi di cui sopra, la preparazione del sottofondo consisterà semplicemente nella rimozione di eventuali oli, grassi, sporco e sostanze incoerenti depositate sulla superficie del calcestruzzo mediante sabbiatura o idropulizia. Nel caso, invece, di degrado superficiale dell'elemento strutturale che deve essere rinforzato, ma anche quando in assenza di degrado visibile si abbia ragione di ritenere che la qualità del conglomerato sia scadente, è tassativo procedere, prima dell'applicazione del rinforzo, ad una vera e propria riqualifica del manufatto da rinforzare attraverso le seguenti operazioni:

- scarifica di tutte le parti incoerenti o degradate del supporto fino a mettere a nudo le armature corrose e, quindi, per almeno un centimetro oltre il lembo interno delle stesse;
- pulizia di tutte le armature metalliche, mediante sabbiatura, da eventuali tracce di ruggine fino a riportare a nudo l'acciaio non corrosivo;
- ripristino della sezione con malta tixotropica di resistenza meccanica adeguata e modulo elastico compatibile con quello del vecchio calcestruzzo.

Nelle Figure che seguono sono mostrate le tre operazioni sopra illustrate di scarifica, di sabbiatura e di ripristino con malta tixotropica.



**Figura 1.2.7 : Scarifica**



***Figura 1.2.8 : Sabbiatura***



***Figura 1.2.9 : Ripristino con malta tixotropica***

In ogni caso si procede, poi, alla “smussatura” di tutti gli spigoli vivi in corrispondenza dei quali si intende eseguire un risvolto del tessuto. Questa operazione ha lo scopo di evitare l’innescò di tensioni concentrate nel tessuto che ne provocherebbero il prematuro tranciamento.

### 1.2.2.1 Posa in opera dei tessuti in FRP

Eseguita la preparazione del sottofondo si passa all'applicazione dei tessuti. Questa può essere eseguita secondo due metodologie.

- A) Il “dry lay up”, adatto soprattutto a piccoli lavori;
- B) Il “wet lay up”, più idoneo all'esecuzione di lavori su grandi superfici.

A) *Dry lay up*: Questa tecnologia applicativa deve il suo nome ad un metodo di produzione manuale di manufatti in vetroresina da cui, sostanzialmente, deriva. Essa consiste nelle seguenti fasi.

1. Si applica un primer epossidico molto fluido che ha il compito di penetrare nel supporto cementizio creando le migliori condizioni per l'adesione come è illustrato nella Figura che segue.



**Figura 1.2.10 : Applicazione del primer epossidico fluido**

2. Se il sottofondo è particolarmente irregolare, si provvede ad applicare una malta epossidica con spatola metallica come è mostrato nella Figura che segue.



***Figura 1.2.11 : Applicazione a spatola della malta epossidica***

3. Si applica il primo strato di tessuto avendo cura di allineare perfettamente le fibre nella direzione voluta come è mostrato nella Figura seguente.



***Figura 1.2.12 : Stesura a secco del tessuto da impregnare***

4. Si impregna il tessuto mediante una resina epossidica fluida applicata con rullo o pennello come è mostrato nella seguente Figura.



***Figura 1.2.13 : Impregnazione del tessuto con resina epossidica***

5. Si perfeziona l'applicazione del tessuto con una o più passate di un rullo di gomma rigida e di uno speciale rullo metallico al fine di rimuovere eventuali bolle d'aria o di solvente evaporato.



***Figura 1.2.14 : Passaggio del rullo metallico sul tessuto FRP***

6. Si procede, se necessario, ad applicare ulteriori strati di tessuto ripetendo le operazioni da 3 a 5.

Le foto sopra riportate sono state fatte in situ dalla sottoscritta, durante la partecipazione alla posa in opera di tessuti FRP al fine di rinforzare a taglio una colonna, in occasione dello stage presso la Società di Ingegneria ENARCH S.r.l.



***Figura 1.2.15 : Partecipazione alla posa in opera di tessuti FRP, in occasione dello stage presso la Società di Ingegneria ENARCH S.r.l.***

B) *Wet lay up*: Questa tecnica applicativa si differenzia dalla precedente nei punti 3 e 4 nei quali si procede come segue.

3. Immediatamente dopo aver applicato la malta epossidica, s'impregna il tessuto, preventivamente tagliato nella misura desiderata, immergendolo direttamente in una vaschetta contenente la resina epossidica fluida; tolto il tessuto dalla vaschetta, lo si lascia sgocciolare e, premendo tra le mani protette da guanti impermeabili di gomma, si rimuove la resina in eccesso ed eventuali bolle di aria o di solvente evaporato; questa operazione di "strizzatura" può essere effettuata più rapidamente ed efficacemente utilizzando una semplice macchina a rulli per strizzare la biancheria.

4. Infine, si procede all'applicazione del tessuto alla struttura avendo cura di orientare bene le fibre nella direzione voluta.

I passi successivi e la reiterazione di questi sono analoghi a quelli descritti nel metodo precedente.

A polimerizzazione avvenuta (dopo almeno 48 ore dall'applicazione del rinforzo) è bene, in entrambi i metodi applicativi, proteggere il rinforzo dai raggi ultravioletti con una verniciatura opaca di tipo acrilico come quella mostrata in Figura.



**Figura 1.2.16 : Protezione finale dei rinforzi in FRP dai raggi ultravioletti**

Se, in alternativa, si prevede una finitura con un prodotto a base cementizia è bene che, all'atto di applicazione dell'ultimo strato di tessuto, si provveda a seminare sulla superficie di resina ancora fresca, un po' di sabbia fine per irruvidirne la superficie stessa e rendere più facile l'adesione del rivestimento protettivo.

### **1.3 I manufatti pultrusi in FRP**

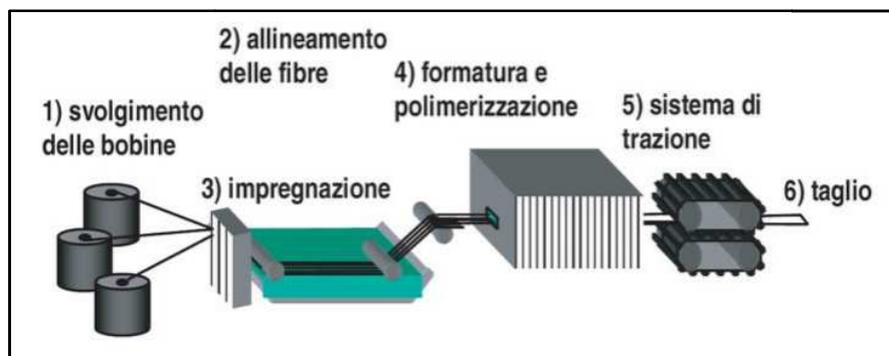
I pultrusi sono manufatti in polimero fibrorinforzato che vengono prodotti industrialmente attraverso un processo completamente automatizzato chiamato pultrusione. Il nome deriva dal termine inglese *pultrusion* il quale, a sua volta, nasce dalla contrazione di due parole: *pull* (tirare) ed *extrusion* (estrusione). La tecnologia, infatti, prevede la produzione di manufatti in composito attraverso un processo analogo a quello utilizzato nel settore dei laterizi (estrusione), nel quale le fibre continue vengono sottoposte ad una sollecitazione di trazione (a differenza dell'estrusione dei laterizi in cui il materiale è sottoposto ad una sollecitazione di compressione) che ha il compito di garantirne un perfetto allineamento prima della polimerizzazione della matrice.

Un tipico impianto per la produzione di manufatti pultrusi comprende:

- 1) una stazione di svolgimento delle bobine di fibra continua;

- 2) un sistema di allineamento delle fibre;
- 3) una vasca per l'impregnazione in resina delle fibre;
- 4) una stazione di formatura e stagionatura dove viene rimossa la resina in eccesso e viene eseguita una stagionatura accelerata a caldo o a microonde per consentirne la rapida polimerizzazione;
- 5) un sistema di cingoli o ganasce che servono ad esercitare la forza di trazione ed ad consentire l'avanzamento del prodotto;
- 6) una stazione di taglio del prodotto finito nella lunghezza voluta.

La successiva Figura riassume schematicamente il processo produttivo dei materiali pultrusi sopra illustrato.



**Figura 1.3.1 : Processo di pultrusione**

Il processo di pultrusione consente la produzione di manufatti caratterizzati da un uniforme allineamento delle fibre e da un contenuto di rinforzo (espresso come percentuale di volume di fibre rispetto al volume totale) elevatissimo e non raggiungibile con nessun'altra tecnologia. Normalmente un manufatto pultruso ha un tasso di rinforzo variabile tra il 50% e il 60% che è circa il doppio di quello che si può conseguire con tecniche di lay up manuale. Inoltre, la percentuale di rinforzo e, quindi, le prestazioni finali del composito, sono controllabili con estrema precisione.

Il limite della pultrusione sta nella possibilità di realizzare esclusivamente manufatti a sezione costante e con fibre tutte orientate in un'unica direzione. Pertanto, con questa tecnologia, vengono prodotti esclusivamente lamine, profilati e barre di varia sezione.

Nel settore delle nuove costruzioni i manufatti pultrusi, soprattutto in vetroresina, stanno trovando applicazioni nella realizzazione di opere di finitura come infissi (in

sostituzione dell'acciaio e dell'alluminio) o pannelli leggeri autoportanti per il tamponamento di opere prefabbricate. Poche sono, invece, sempre con riferimento alle nuove costruzioni, le applicazioni di manufatti pultrusi in ambito strutturale e si limitano, soprattutto, ad alcuni tentativi effettuati di sostituire i tradizionali profilati in acciaio per carpenteria metallica con analoghi elementi in FRP pultrusi. Sono intuibili i vantaggi che ne conseguirebbero, in termini di leggerezza e, quindi, di facilità di posa in opera; esistono, però, problemi irrisolti legati, soprattutto, alla fragilità dei sistemi di connessione tra vari elementi. Inoltre, nel settore delle nuove costruzioni, i manufatti compositi pultrusi presentano un limite dovuto al loro costo che risulta ancora eccessivo rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali. Esistono infine in commercio barre cilindriche pultruse in fibra di vetro o carbonio da utilizzare in sostituzione delle tradizionali armature in acciaio nella realizzazione di strutture in C.A. esposte ad ambienti particolarmente aggressivi per le armature stesse (strutture portuali od in adiacenza al mare, ponti stradali in zone montane in cui si fa uso corrente di sali disgelanti). Il limite di applicazione, in questo caso, sta nel fatto che le barre in FRP non possono essere lavorate, così come si fa con le barre metalliche, per ottenere staffe o pezzi sagomati. Questi pezzi speciali, infatti, possono essere ottenuti solo per stampaggio in appositi impianti con evidente complicazione e limitazione nelle forme e nelle dimensioni ottenibili, e con aumento dei costi.

Più frequente è l'utilizzo dei manufatti pultrusi nel restauro strutturale dove gli innegabili vantaggi che si possono conseguire rispetto a tecniche tradizionali di intervento e la grande facilità di posa in opera compensano quasi sempre l'elevato costo di questi materiali, rendendone economicamente conveniente l'utilizzo. Negli interventi di restauro, i manufatti pultrusi vengono utilizzati soprattutto in forma di lamine e, meno spesso, in forma di barre. Lamine pultruse in fibra di carbonio vengono ormai correntemente utilizzate per il rinforzo a flessione di travi e solai in sostituzione delle lastre metalliche che venivano utilizzate, fin dai primi anni del secolo scorso, nella tecnica nota come *béton plaqué*. Le lamine vengono incollate all'elemento da rinforzare mediante resine epossidiche in pasta la cui viscosità è generalmente sufficiente a tenerle in posizione senza bisogno di inserire puntelli e sostegni così come, invece, risulta necessario se si fa uso di piastre metalliche, aventi un peso decisamente maggiore.

Rispetto all'utilizzo di tessuti direttamente impregnati in opera l'applicazione di lamine pultruse presenta dei vantaggi in termini di facilità e rapidità di posa in opera e di sicurezza della riuscita dell'intervento. La loro relativa rigidità, però, ne limita le possibilità di utilizzo a superfici piane o caratterizzate da grande raggio di curvatura (serbatoi e volte a botte di grandi dimensioni).

### *1.3.1 Il rinforzo delle strutture mediante incollaggio di lamine pultruse*

Anche nel caso di rinforzo per incollaggio di lamine pultruse occorre eseguire preventivamente una preparazione o, se necessario, una bonifica del sottofondo in calcestruzzo. Successivamente, si procede come segue:

- 1) stendere uno strato di resina in pasta per uno strato di 1-2mm di spessore;
- 2) applicare un equivalente strato di adesivo sull'apposito lato ruvido della lamina;
- 3) applicare il rinforzo alla struttura esercitando una pressione uniforme con le mani o, preferibilmente, con un rullo di plastica dura;
- 4) rimuovere la resina in eccesso.

Dopo circa 24 ore, normalmente, si può procedere all'applicazione di un rivestimento protettivo nei confronti dei raggi ultravioletti.



*Figura 1.3.2 : Lamina pultrusa in fibra di carbonio*



*Figura 1.3.3 : Lamine pultruse per rinforzare l'intradosso di una soletta in cemento armato*

## CAPITOLO 2:

### I COMPOSITI CFRP

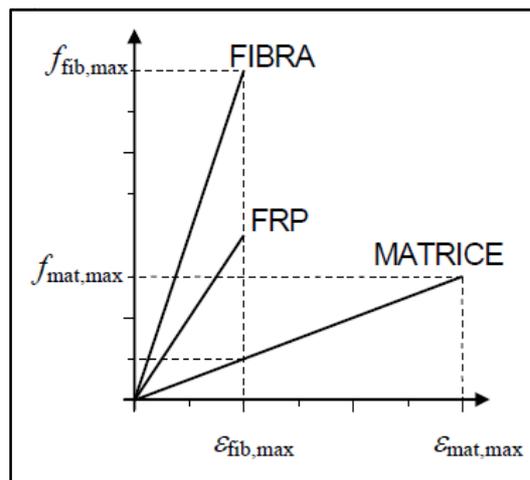
Dal punto di vista meccanico, nell'ambito delle *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati* delineate dal CNR-DT 200 R1/2013, i suddetti sistemi sono classificati in base ai valori del modulo elastico e della tensione di rottura. Tali grandezze valutate in regime di trazione uniassiale nella direzione delle fibre, devono essere riferite, nel caso di sistemi di rinforzo preformati, all'unità di superficie complessiva del composito FRP (fibre e matrice); nel caso invece dei sistemi realizzati in situ, all'area delle sole fibre secche del composito. La predetta classificazione è congruente con quella adottata in Italia nella *Linea Guida per la Qualificazione ed il Controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*, emanata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale.

#### 2.1 Proprietà meccaniche dei compositi FRP

Nei compositi FRP 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 le fibre e tra queste e l'elemento strutturale a cui il composto è stato applicato. 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. Di seguito vengono riportati in Tabella i valori indicativi delle principali proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione per un immediato confronto.

	Modulo elastico	Resistenza a trazione	Deformazione a rottura	Densità
	[GPa]	[MPa]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Fibre di Carbonio</b>	240-280	4100-5100	1.6-1.73	1.75
<b>Fibre di Vetro</b>	70-90	2000-4800	3.5-5.5	2.46-2.6
<b>Fibre Aramidiche</b>	62-180	3600-3800	1.9-5.5	1.44-1.47
<b>Matrice Polimerica</b>	2.7-3.6	40-82	1.4-5.2	1.10-1.25
<b>Acciaio da costruzione</b>	206	snervamento: 250-400; rottura: 350-600	20-30	7.8

Un composito fibrorinforzato unidirezionale esibisce rispetto alle fibre una rigidezza inferiore ma la medesima deformazione a rottura, giacché, una volta superata tale deformazione, diviene impossibile il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre. I legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito sono diagrammati nella seguente Figura.



**Figura 2.1.1 : Legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente composito**

Nel caso dei compositi di tipo unidirezionale è possibile, con ragionevole approssimazione, stimare il loro comportamento meccanico mediante modelli micromeccanici; ad esempio, utilizzando la regola delle miscele:

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

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

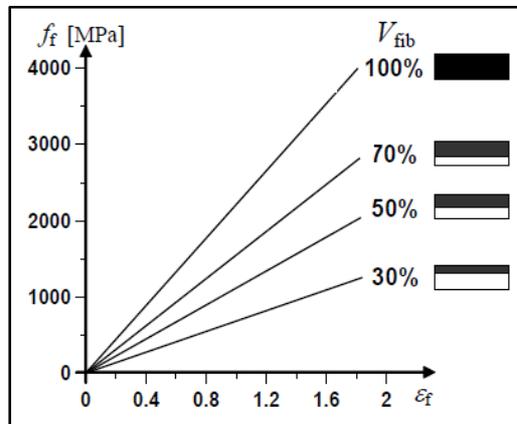
Dove:

- $E_f$  è il modulo elastico del composito FRP;
- $f_f$  è la resistenza a trazione del composito FRP;
- $V_{fib}$  è il rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito;

Si segnala che la regola delle miscele, basata sull'ipotesi di perfetta aderenza tra fibre e matrice, fornisce una stima abbastanza accurata del modulo di elasticità normale ma non altrettanto affidabile della resistenza. L'approssimazione discende sostanzialmente dalla circostanza che i suddetti valori non tengono conto dell'influenza di altri importanti parametri, quali l'aderenza effettiva tra fibre e

matrice, i difetti di produzione, la presenza di vuoti e/o di imperfezioni nella distribuzione o nell'allineamento delle fibre. Una valutazione più realistica richiede l'esecuzione di prove sperimentali in numero tale da fornire risultati statisticamente significativi, che tengano conto anche del livello qualitativo della tecnica produttiva.

In prima analisi, utilizzando la regola delle miscele, è possibile stimare i valori delle proprietà meccaniche dei compositi FRP nella direzione delle fibre. Da questa prima stima si evince che le proprietà meccaniche del composito ( $E_f$  ed  $f_f$ ) sono sensibilmente influenzate dalla frazione volumetrica  $V_{fib}$ , come mostra la seguente Figura.



**Figura 2.1.2 : Dipendenza del legame costitutivo del composito dalla frazione volumetrica**

A titolo d'esempio si prendono le seguenti componenti di un generico composito.

Fibre	Matrice
$E_{fib} = 220$ GPa	$E_{mat} = 3$ GPa
$f_{fib} = 4000$ MPa	$f_{mat} = 80$ MPa

Mantenendo costante l'area occupata dalle fibre, si varia l'area occupata dalla matrice, variando di conseguenza l'area occupata dal composito  $A_f$  e la frazione volumetrica  $V_{fib}$ . I valori delle proprietà meccaniche del composito, ottenuti utilizzando la regola delle miscele, al variare di  $V_{fib}$ , sono riportati nella seguente Tabella.

$A_{fib}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{mat}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	$V_{fib}$ [%]	$E_f$ [GPa]	$f_f$ [MPa]	$\varepsilon_{fu}$ [%]	$F_{fu}$ [kN]	$E_f \cdot A_f$ [kN]
70	0	70	100	220.0	4000	1.81	280.0	15400
70	30	100	70	154.9	2824	1.82	282.4	15490
70	70	140	50	111.5	2040	1.83	285.6	15610

Dalla Tabella si nota l'influenza di  $V_{fib}$  sulle proprietà meccaniche del composito. Invece, i valori della forza ultima di rottura,  $F_{fu}=f_f A_f$ , e della rigidezza estensionale,  $E_f A_f$ , presentano variazioni trascurabili al variare di  $V_{fib}$ , dal momento che eventuali riduzioni dei valori di  $E_f$  ed  $f_f$  sono compensate dall'incremento del valore di  $A_f$ .

E' quindi preferibile riferirsi alla forza ultima di rottura  $F_{fu}$  e alla rigidezza estensionale  $E_f A_f$  per la determinazione delle proprietà meccaniche del composito FRP.

Le proprietà meccaniche dei *compositi FRP preformati*,  $E_f$  ed  $f_f$ , sono valutate per il tramite delle seguente equazioni.

$$f_f = F_{fu} / A_f$$

$$E_f = F_{fu} / (A_f \cdot \epsilon_{fu})$$

Essendo  $F_{fu}$  ed  $\epsilon_{fu}$ , rispettivamente, la forza e la deformazione ultima, determinate sperimentalmente, ed  $A_f$  l'area della sezione retta del preformato.

Le proprietà meccaniche dei *compositi FRP impregnati in situ*,  $E_f$  ed  $f_f$ , sono valutate per il tramite delle seguente equazioni.

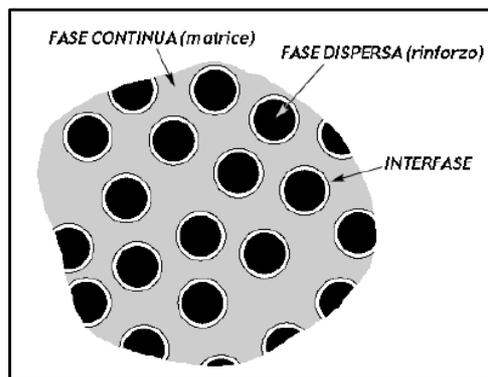
$$f_f = F_{fu} / A_{fib}$$

$$E_f = F_{fu} / (A_{fib} \cdot \epsilon_{fu})$$

Le proprietà meccaniche di un composito impregnato in situ sono riferite all'area delle sole fibre secche del composito ( $A_f=A_{fib}$ ). Ciò è giustificato dalla difficoltà di quantificare le frazioni volumetriche delle fasi, per l'incertezza sull'effettiva quantità di resina messa in opera manualmente.

E' essenziale non dimenticare che per ottenere un composito FRP ad elevata resistenza meccanica non è sufficiente utilizzare fibre "resistenti": è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice e la fibra. L'adesione viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente, che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende compatibile con la matrice

organica. Questa terza fase intermedia tra la matrice e le fibre è detta interfase o interfaccia. L'interfaccia consiste normalmente in uno strato molto sottile, localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono tuttavia fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali.



**Figura 2.1.3 : Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito**

### 2.1.1 Confronto tra le caratteristiche meccaniche di un laminato preformato e di un tessuto unidirezionale impregnato in situ

Richiamando l'esempio presente sulle Istruzioni del CNR, si considerino allo scopo due tipi di compositi, il primo costituito da un tessuto unidirezionale a base di fibra di carbonio da impregnare in situ, il secondo costituito da un composito preformato pultruso. Si assume che entrambi i compositi siano applicati al supporto mediante un adesivo epossidico. Si espongono in forma tabellare le caratteristiche meccaniche dei materiali desunte dalle rispettive schede tecniche.

Sistema 1	Sistema 2
Tipologia: Tessuto unidirezionale CFRP e resina epossidica	Tipologia: Laminato pultruso CFRP e resina epossidica
Installazione con tecnica <i>wet lay-up</i>	Installazione mediante incollaggio
Proprietà meccaniche*	Proprietà meccaniche**
$t_f = 0.45 \text{ mm}$	$t_f = 1.2 \text{ mm}$
$f_f = 4200 \text{ N/mm}^2$	$f_f = 2800 \text{ N/mm}^2$
$\varepsilon_f = 1.8\%$	$\varepsilon_f = 1.7\%$
$E_f = 235000 \text{ N/mm}^2$	$E_f = 165000 \text{ N/mm}^2$
* Proprietà del composito riferite all'area delle fibre nude	
** Proprietà del composito riferite all'area complessiva del putruso	

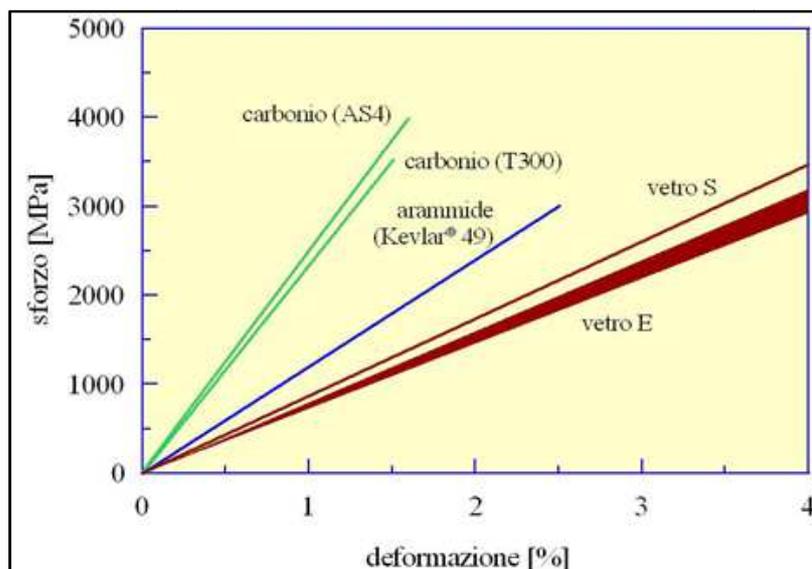
Per eseguire il confronto diventa comodo calcolare per ogni sistema la resistenza a trazione per unità di larghezza ed il modulo elastico per unità di larghezza ed eseguire il confronto rispetto a queste quantità tra i due sistemi.

Sistema 1	Sistema 2
Tipologia: Tessuto unidirezionale CFRP e resina epossidica Installazione con tecnica wet layup	Tipologia: Laminato pultruso CFRP e resina epossidica Installazione mediante incollaggio
1) Calcolo della resistenza a trazione per unità di larghezza $f_t \cdot t_t = 1890 \text{ N/mm}$	1) Calcolo della resistenza a trazione per unità di larghezza $f_t \cdot t_t = 3360 \text{ N/mm}$
2) Calcolo della modulo elastico per unità di larghezza $E_t \cdot t_t = 105750 \text{ N/mm}$	2) Calcolo del modulo elastico per unità di larghezza $E_t \cdot t_t = 198000 \text{ N/mm}$
3a) Confronto tra i due sistemi rispetto alla resistenza a trazione $\frac{f_t^{(2)} \cdot t_t^{(2)}}{f_t^{(1)} \cdot t_t^{(1)}} = 1.77$	
3b) Confronto tra i due sistemi rispetto al modulo elastico $\frac{E_t^{(2)} \cdot t_t^{(2)}}{E_t^{(1)} \cdot t_t^{(1)}} = 1.87$	

In tal modo si constata che è necessario adoperare due strati di tessuto unidirezionale (Sistema 1) per garantire resistenza e rigidità equivalenti a quelle del laminato pultruso (Sistema 2) [6].

## 2.2 Fibre usate per la produzione di materiali compositi FRP

Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi FRP sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. La particolare geometria filiforme, ancorché molto versatile per la realizzazione dei compositi FRP, conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale; ciò è dovuto alla minore densità di difetti che tipicamente compete alla configurazione monodimensionale rispetto a quest'ultima. Le proprietà meccaniche che caratterizzano tali fibre sono state descritte in modo tabellare nel precedente paragrafo. In detta Tabella le fibre di carbonio mostrano valori del modulo di elasticità normale molto più elevati di quelli relativi ai comuni materiali da costruzione. Si tratta quindi di materiali molto più efficienti per il consolidamento delle strutture in cemento armato, dove è necessario garantire un più alto modulo elastico e quindi maggiore capacità di assumere carichi a parità di deformazioni della struttura rinforzata. Tuttavia, possono generare problemi ad esempio nelle strutture in muratura, sulle quali sono più adatte ad essere impiegate le fibre aramidiche, non essendo necessario un elevato modulo elastico del rinforzo, che invece potrebbe essere sfavorevole.



**Figura 2.2.1 : Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale**

### 2.2.1 Fibre di Vetro

Le fibre di vetro sono comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Si caratterizzano per la loro elevata resistenza. Le fibre di vetro esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica del materiale composito [6].

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano con l'acronimo GFRP.

### 2.2.2 Fibre di Carbonio

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata

resistenza. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate. A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per tale motivo il loro modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo). La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine “fibre di grafite” viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune 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) e di rayon. Le fibre di PAN vengono dapprima “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 in atmosfera inerte, durante il quale la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio, presenti nel precursore, sono eliminati. Le fibre carbonizzate possono quindi essere sottoposte ad un trattamento di grafitizzazione in atmosfera inerte a 3000 °C, durante il quale la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente, avvicinandosi a quella della grafite pura [6].

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano con l’acronimo CFRP.

### 2.2.2.1 I vantaggi dei compositi CFRP

I vantaggi connessi con l'utilizzo dei prodotti CFRP rispetto alle tecnologie tradizionali sono molteplici e tra questi i più evidenti sono:

- *Altissima resistenza*; quindi maggiore capacità di assumere carichi;
- *Bassa densità e spessore medio contenuto*; quindi l'incremento del peso proprio della struttura risulta trascurabile e presenta notevoli vantaggi in campo sismico dove le sollecitazioni sono proporzionali alle masse in gioco;
- *Scarsa invasività*; il materiale viene applicato sulla superficie esterna della struttura e, con uno spessore di pochi millimetri, è facilmente occultabile da uno strato d'intonaco;
- *Eccezionale resistenza a fatica ed all'azione di carichi ciclici*; l'elevata capacità di dissipazione dell'energia di deformazione è particolarmente importante in zone sismiche;
- *Esente da corrosione*; a differenza di quanto avviene per le piastre di acciaio utilizzate negli interventi di ripristino realizzati con la tecnica del beton plaqué;
- *Elevata durabilità*; molto resistenti all'effetto di agenti chimici come gli alcali che reagendo con gli aggregati del calcestruzzo provocano l'espansione di questo e la sua fessurazione;
- *Reversibilità dell'intervento*; gli interventi sono completamente reversibili in quanto i rinforzi e gli strati di adesivo possono essere asportati fino a ripristinare completamente la situazione precedente all'intervento (edifici di interesse storico o artistico);
- *Semplicità e velocità di posa in opera*; i prodotti, grazie alla loro estrema leggerezza, si applicano e vengono messi in opera senza l'ausilio di particolari attrezzature e macchinari, da un numero limitato di operatori, in tempi estremamente brevi e, spesso, senza che risulti necessario interrompere l'esercizio della struttura;
- *Facili da trasportare*; vengono trasportati in rotoli.

### 2.2.2.2 I campi di impiego dei compositi CFRP

I compositi CFRP vengono utilizzati per rinforzare strutture per:

- Incremento dei carichi:
  - Incremento dei carichi statici
  - Incremento dei carichi dinamici
  - Installazione di macchinari pesanti in edifici ad uso industriale

- Modifiche d'uso di edifici
- Danni agli elementi strutturali:
  - Invecchiamento dei materiali edili
  - Corrosione dei ferri d'armatura
  - Collisioni di veicoli
  - Incendi
  - Sismi
- Miglioramento dell'efficienza statica:
  - Riduzione delle deformazioni
  - Riduzione delle sollecitazioni a carico dei ferri d'armatura
  - Riduzione dell'ampiezza delle fessurazioni
- Modifiche del sistema strutturale:
  - Demolizione di pareti o colonne
  - Demolizione di parti di solette per praticare aperture
- Modifiche delle normative:
  - Realizzazioni antisismiche
  - Adeguamenti per modifiche dell'approccio progettuale

### 2.2.3 *Fibre aramidiche*

Esse 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 loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione; infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature. Le fibre aramidiche 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 (rilassamento) è molto più marcata e progressiva nel tempo. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro [6].

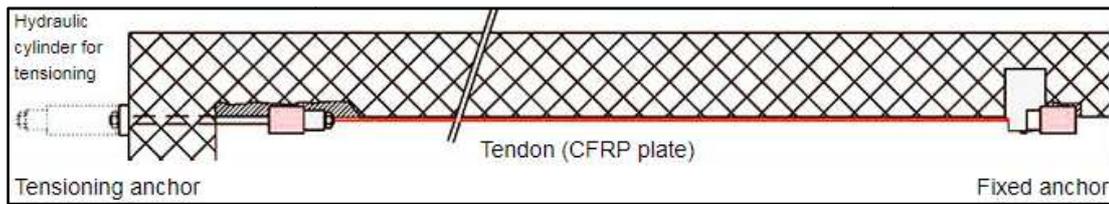
Gli FRP a base di fibre aramidiche si denotano con l'acronimo AFRP.

### STRESSHEAD-CARBOSTRESS POST-TENSIONING SYSTEM

La capacità portante e lo stato di servizio di diversi tipi di strutture, come ponti, strutture industriali ed edifici multipiano, possono decadere per l'applicazione di carichi più elevati, variazione della destinazione d'uso, modifiche allo schema strutturale e fenomeni di corrosione delle armature. Una soluzione innovativa che può essere utilizzata per risolvere queste problematiche è lo *StressHead-CarboStress post-tensioning system*. Si tratta di un innovativo sistema di rinforzo strutturale realizzato con lastre pultruse in CFRP aderenti al supporto e messe in tensione durante la fase di polimerizzazione dell'adesivo per mezzo di martinetti idraulici, per essere in seguito rilasciate in modo da generare una precompressione esterna sull'elemento da rinforzare. Si tratta di un rinforzo attivo.

#### 3.1 Descrizione dell'innovativo sistema di rinforzo

Le lamine pultruse in fibra di carbonio passive rese aderenti alla struttura mediante placcaggio vengono in tal modo a costituire per la struttura da rinforzare una armatura aggiuntiva non metallica che consente di aumentare il momento ultimo della sezione. Tuttavia nelle travi da ponte il modesto incremento di rigidità conseguibile con questa tecnica non consente di ottenere alcun significativo beneficio nella fase di servizio a fronte di una perdita di precompressione che può manifestarsi qualora risultino danneggiati, a seguito del degrado o di un impatto, trefoli o cavi di post-tensione. Dunque un utilizzo mirato in grado di ripristinare la capacità portante della struttura anche nei confronti dello stato limite di esercizio consiste nella pretensione di lamine pultruse in fibra di carbonio, tecnologia questa che consente di applicare una coazione alla trave alla stessa stregua della precompressione impressa mediante trefoli di acciaio armonico. Si tratta di un innovativo sistema di precompressione esterna, sviluppato dalla società svizzera StressHead AG e brevettato dalla CTI, Commissione per la Tecnologia e l'Innovazione.



**Figura 3.1.1 : StressHead-CarboStress post-tensioning system**

Si tratta di un sistema di rinforzo attivo eseguito da una post-tensione esterna ed aderente alla trave. Tale sistema è costituito da un tirante (lastra pultrusa CFRP) e due ancoraggi che trasferiscono la forza di compressione all'elemento strutturale in forma concentrata alle estremità della lastra. Il sistema ha un ancoraggio fisso ed un ancoraggio di post-tensione. L'ancoraggio fisso tiene una estremità del tirante in una posizione definita e all'estremità opposta l'ancoraggio di post-tensione mette il tirante in tensione per mezzo di martinetto idraulico.

### *3.1.1 Caratteristiche delle componenti dello StressHead-CarboStress post-tensioning system*

Le caratteristiche degli ancoraggi *StressHead* sono le seguenti:

- Materiale: CFRP;
- Carico di precompressione: 220kN.



**Figura 3.1.2 : StressHead 220**

Le caratteristiche della lastra pultrusa CFRP sono quelle della lastra pultrusa *Sika CarboDur S626*, sviluppata dalla Sika ed in possesso del CIT, Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego per Uso Strutturale. In accordo alla *Linea Guida per la Qualificazione ed il Controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*, le caratteristiche della lastra pultrusa *Sika CarboDur S626* sono le seguenti:

- Proprietà del materiale: Elastico;
- Modulo longitudinale della lastra: 165000 MPa;
- Resistenza a trazione: 2800 MPa;
- Deformazione a rottura: 1.70 %;
- Sezione trasversale della lastra: 60\*2.6 mm<sup>2</sup>.

### **3.2 I vantaggi delle lamine pretese pultruse in fibra di carbonio**

- Movimentazione agevole grazie al peso contenuto;
- Non voluminoso grazie alla sezione sottile;
- Installazione facile e veloce (ved. Allegato K);
- Semplice precompressione degli elementi strutturali preesistenti;
- Perdita contenuta della precompressione grazie alla sollecitazione di trazione più elevata;
- Livello di sollecitazione analogo per le lamine CFRP e precompressione acciaio;
- Tirante di precompressione esente da corrosione;
- Nessun rischio di fessurazione per corrosione da sollecitazione;
- Sfruttamento ottimale delle elevate resistenze meccaniche delle lamine in CFRP;
- Dal 30 al 50% di lamine in meno rispetto all'uso di lamine non pretese;
- Miglioramento dell'efficienza statica: riduzione dell'ampiezza delle fessurazioni, sollecitazione di trazione e corrosione a carico dell'acciaio;
- Effetto di rinforzo "attivabile" anche per il carico permanente;
- Riduzione della sollecitazione di trazione a carico dei rinforzi in acciaio preesistenti;
- Ancoraggi terminali corti delle lamine;
- Uso sia in direzione longitudinale che trasversale;
- Rapporto ottimale prezzo/prestazioni per il rinforzo del cemento armato.

### **3.3 Processo d'installazione del sistema di rinforzo**

In accordo alle *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati* delineate dal CNR, il funzionamento ottimale di un sistema di rinforzo con materiali compositi è subordinato a diversi fattori. La qualità dell'esecuzione del rinforzo dipende strettamente dalle condizioni del substrato su cui il rinforzo deve essere applicato e dalla messa in opera del rinforzo.

### *3.3.1 Preparazione preventiva del substrato*

L'applicazione del sistema di rinforzo richiede il preventivo controllo delle condizioni di deterioramento del substrato con l'adozione di provvedimenti atti a migliorarne lo stato, fino a rimuovere e ricostruire le parti ammalorate. Se necessario, devono essere previsti provvedimenti di pulizia e passivazione delle armature metalliche corrose. In ogni caso la resistenza media a compressione del calcestruzzo non deve essere inferiore a  $15 \text{ N/mm}^2$ . In caso contrario, la tecnica di rinforzo studiata non può essere applicata.

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. 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 dello stesso calcestruzzo. Tali interventi sono assolutamente necessari prima di procedere alla ricostruzione delle parti di calcestruzzo rimosse. 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. Una volta che il calcestruzzo deteriorato sia stato completamente rimosso e siano stati adottati i provvedimenti più opportuni per arrestare la corrosione delle armature metalliche, nonché tutti gli altri fenomeni che siano causa di degrado (ad esempio infiltrazioni d'acqua), si può procedere al suo reintegro mediante l'utilizzo di betoncini reoplastici. Al ripristino delle parti di calcestruzzo ammalorate è opportuno associare il livellamento di eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm, da effettuarsi ad esempio con stucco epossidico compatibile; nel caso in cui la zona da colmare abbia profondità superiore a 20 mm si deve utilizzare un idoneo materiale di apporto. Se l'elemento da rinforzare presenta fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm, è opportuno che queste ultime siano sigillate mediante iniezione prima di applicare il rinforzo. Infine può essere opportuno ricorrere ad un ulteriore provvedimento di sabbiatura a carico della superficie interessata dal rinforzo. La sabbiatura deve

assicurare un grado di ruvidezza almeno pari a 0.3 mm, valutabile mediante appositi strumenti quale, ad esempio, un profilometro laser [6].

### *3.3.2 Messa in opera del sistema di rinforzo*

Il rinforzo non va installato se l'ambiente è molto umido in quanto un elevato grado di umidità può ritardare la stagionatura della resina. Il composito deve essere applicato nelle condizioni igrometriche e termiche definite nelle schede tecniche della Sika. In condizioni di pioggia, eccessivo soleggiamento, forti gradienti termici, elevata umidità o in presenza di polveri può essere opportuno avvalersi di teli protettivi.

Nel caso di sistemi di rinforzo CFRP, ove necessario, è opportuno prevedere strati di materiale isolante, allo scopo di evitare l'innesco di corrosione galvanica per il contatto tra le fibre di carbonio e l'acciaio delle armature.

Da normativa è prevista una lunghezza di ancoraggio almeno pari a 200 mm; in alternativa, è possibile l'impiego di connettori meccanici, caso del sistema di rinforzo studiato dotato degli ancoraggi StressHead. In accordo alla normativa i sistemi tecnologici utilizzati per l'ancoraggio delle estremità delle lastre devono essere oggetto di idonee indagini sperimentali condotte secondo criteri normalizzati. La società svizzera StressHead AG ha eseguito prove sperimentali di pull-out, indagini a lungo termine e prove dinamiche.



***Figura 3.3.1 : Indagini a lungo termine eseguite dalla società svizzera StressHead  
AG***



*Figura 3.3.2 : Prova dinamica eseguita dalla società svizzera StressHead AG*

### *3.3.2.1 Installazione degli ancoraggi*

Dopo l'esecuzione degli opportuni alloggiamenti nell'elemento da rinforzare in corrispondenza delle posizioni che occuperanno gli ancoraggi StressHead, vengono posizionati l'ancoraggio fisso e l'ancoraggio mobile nella trave da ponte.



*Figura 3.3.3 : Installazione degli ancoraggi*

### 3.3.2.2 Tesatura della lastra pultrusa CFRP

Si installa la lastra pultrusa CFRP all'interno degli ancoraggi, placcandola all'intradosso della trave con adesivo *Sikadur 30*. La messa in tensione della lastra avviene durante la fase di polimerizzazione della resina per mezzo di martinetto idraulico che, ancorandosi alla contropiastra, parallela alla stessa lastra e preventivamente inserita, induce per contrasto una compressione eccentrica sulla trave. La successiva polimerizzazione della resina rende poi solidale alla trave la lastra che, in tal modo, funge anche da armatura aderente nei confronti delle sollecitazioni indotte dai carichi mobili. L'aspetto qualificante di questo particolare sistema di precompressione risiede nel ruolo delle piastre di ancoraggio permanente che vengono inserite alle estremità del composito prima di rimuovere il martinetto e che stringono mediante il serraggio di perni la lastra alle contropiastre alloggiata nella trave. Questo meccanismo consente di incrementare la resistenza allo scorrimento per attrito in virtù dell'elevata pressione conseguita con il serraggio, al punto tale che l'intero sforzo di trazione impresso alla lastra viene assorbito nella lunghezza dell'ancoraggio stesso. La pressione indotta dal serraggio fornisce una presollecitazione che mantiene compressa ed aderente la lastra al supporto in acciaio, inibendo il distacco per peeling del composito dal supporto. Nel sistema in esame la lastra è placcata all'interno del dispositivo di ancoraggio sia all'estradosso, alla contropiastra inserita nella trave, che all'intradosso, alla piastra di ancoraggio permanente. Infine si provvede al riempimento con malta antiritiro delle nicchie ricavate per installare gli ancoraggi e le contropiastre ed al placcaggio delle parti terminali non pretese della lamina.



**Figura 3.3.4 : Tesatura della lastra pultrusa CFRP per mezzo di martinetto idraulico**



*Figura 3.3.5 : Gli StressHead-CarboStress post-tensioning systems installati e testati con successo*

### **3.4 Protezione del sistema di rinforzo**

Per proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare, che può produrre alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica, si applica uno strato di protezione di colore chiaro a base di vernice acrilica all'acqua, che, una volta essiccata, forma una pellicola elastica impermeabile all'acqua ed al CO<sub>2</sub> e permeabile al vapore, previa pulitura della superficie del composito mediante l'uso di una spugna satura d'acqua saponata. In alternativa, una protezione più elevata può essere garantita con l'applicazione sul composito di intonaci o malte (preferibilmente di natura cementizia). Tali intonaci, i cui spessori sono generalmente consigliati dal Produttore e/o Fornitore, devono essere posati sul sistema di rinforzo previa preparazione della superficie mediante applicazione di resina epossidica con successivo spolvero "fresco su fresco" di polvere di quarzo.

I materiali FRP realizzati con matrici polimeriche sono particolarmente sensibili all'esposizione alle alte temperature, come ad esempio quelle che possono prodursi in caso di incendio. Quando la temperatura di esercizio supera quella di transizione vetrosa della resina (o della temperatura di fusione nel caso di materiali

semicristallini) 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 dal substrato e perdita di efficacia dell'intervento stesso di rinforzo.

Ai fini della protezione al fuoco possono essere adottate due tecniche differenti: l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi. In entrambi i casi il Produttore e/o Fornitore deve indicare sulle schede tecniche il grado di protezione conseguibile in relazione allo spessore del rivestimento. I rivestimenti protettivi in condizioni d'incendio sono intumescenti per evitare la generazione di fumi tossici. I pannelli – in genere a base di calciosilicati – vengono posati sul rinforzo previo inserimento di tasselli che non devono mai tagliare o forare le fibre. L'intonaco intumescente, di più frequente utilizzazione, deve essere applicato sul composito seguendo le indicazioni riportate prima per l'applicazione di intonaci sul sistema di rinforzo [6].

### **3.5 Controllo e monitoraggio dell'intervento di rinforzo**

In accordo alle *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati* delineate dal CNR, è richiesto il controllo di accettazione dei sistemi di rinforzo. Una volta che l'intervento di rinforzo sia stato realizzato, è necessario procedere al suo controllo ai fini del collaudo ed, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo. In entrambi i casi è possibile ricorrere sia a prove non distruttive che a prove parzialmente distruttive. Per l'esecuzione di tali prove sono richieste specifiche qualifiche del personale addetto, in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 473 e UNI EN 45013. I controlli di accettazione del sistema di rinforzo e delle sue componenti in cantiere sono effettuati mediante prove distruttive su provini, il numero e tipo sono definiti dalla *Linea Guida per la Qualificazione ed il Controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*.

### 3.5.1 Controllo dell'intervento di rinforzo

Le prove semi-distruttive sono soprattutto indicative per la caratterizzazione meccanica del sistema di rinforzo messo in opera. L'eventuale presenza di difetti nella realizzazione può invece essere rilevata mediante prove non distruttive. Il tipo e la numerosità delle prove da eseguire devono essere commisurati all'importanza dell'intervento, valutando l'incidenza delle zone trattate in rapporto alle dimensioni della struttura [6].

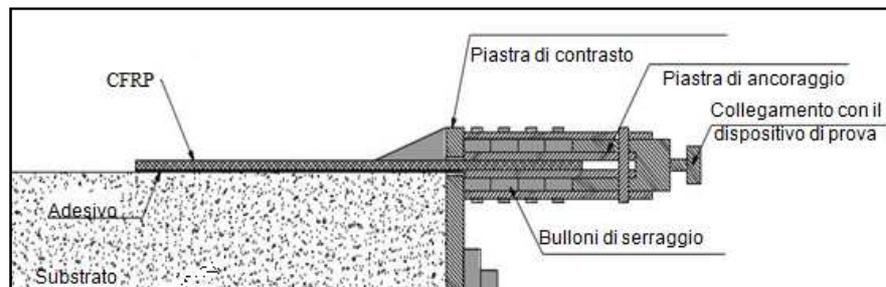
#### 3.5.1.1 Prove semi-distruttive

Possono essere eseguite sia prove di strappo normale che prove di strappo a taglio. Le prove semi-distruttive vanno condotte sui *testimoni*, che sono zone aggiuntive di rinforzo realizzate, durante l'installazione, in parti della struttura opportunamente selezionate. Tali zone, suddivise in fazzoletti di dimensioni superiori a  $500 \times 200 \text{ mm}^2$ , devono presentare un'estensione totale minima di  $0.1 \text{ m}^2$  e comunque non inferiore allo 0.5% di quella complessiva del rinforzo. I fazzoletti devono essere realizzati contestualmente all'intervento di rinforzo, con gli stessi materiali e tecniche costruttive, in zone in cui la loro rimozione non comporti alterazione dei meccanismi di collasso, curando che siano esposti alle stesse condizioni ambientali del rinforzo principale. Se in numero maggiore di uno, i fazzoletti devono essere distribuiti in maniera uniforme rispetto all'intervento complessivo. Dove possibile, le prove semi-distruttive vanno condotte anche in zone del rinforzo non critiche in ragione di una prova per ogni  $30 \text{ m}^2$  di applicazione per le strutture di C.A. La loro numerosità non deve essere comunque inferiore a 3 per ogni tipo di prova ritenuta significativa in sede di definizione della campagna di controllo.

*Prova di strappo normale:* La prova, utile per l'accertamento delle proprietà del substrato, viene eseguita utilizzando generalmente piastre circolari di acciaio di spessore 20 mm e di diametro non inferiore a 50 mm. Il rinforzo deve essere ritagliato lungo il bordo della piastra. Può essere utilizzata una fresa cilindrica retta di spessore non maggiore di 3 mm, avendo cura di non surriscaldare il composito e di

incidere contestualmente il substrato per una profondità di almeno 2 mm. Per garantire l'ortogonalità della direzione di applicazione della forza di strappo alla superficie del rinforzo, è richiesta l'adozione di specifici presidi, quali ad esempio i giunti sferici. Il substrato può ritenersi idoneo se almeno l'80% delle prove (almeno due su tre nel caso di sole tre prove) forniscono, sulla superficie circolare isolata, una tensione di picco allo strappo non inferiore a 0.9 MPa nel caso di elementi di C.A. Inoltre la superficie di strappo deve essere contenuta all'interno del substrato e non coincidere con l'interfaccia composito - substrato. Nel caso in cui la superficie di strappo coincide con l'interfaccia composito - substrato, l'accettazione della prova è lasciata alla discrezionalità del Direttore dei Lavori.

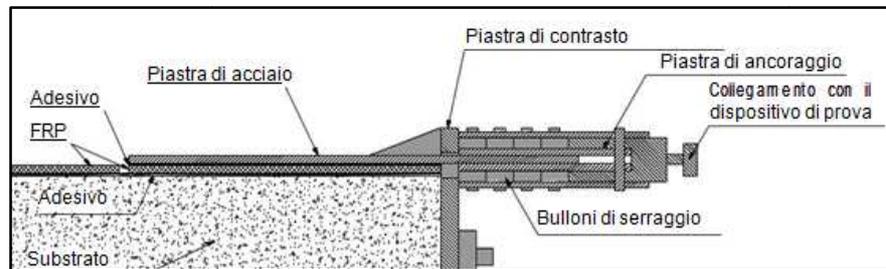
*Prova di strappo a taglio:* Tale prova è utile per l'accertamento della qualità dell'incollaggio e della preventiva preparazione del supporto. Un modo per eseguirla è di seguito descritto. L'esecuzione avviene in corrispondenza di uno spigolo libero della struttura su cui il rinforzo è incollato (prova di tipo "diretto"). È richiesta la disponibilità di un'opportuna porzione libera di materiale composito (cioè non incollata), in continuità del materiale incollato. Su di essa va applicata l'azione radente utilizzando come contrasto il suddetto spigolo.



**Figura 3.5.1 : Prova di strappo a taglio di tipo "diretto"**

In assenza di testimoni, la prova può essere ugualmente eseguita su uno dei rinforzi messi in opera, adottando la procedura di tipo "indiretto". La porzione di materiale composito da sottoporre a prova, anch'essa vicina ad uno spigolo della struttura, deve essere preventivamente sezionata dalla parte rimanente. Sulla faccia a vista di tale porzione deve essere incollata una piastra metallica con una parte aggettante rispetto allo spigolo, la cui lunghezza garantisca l'afferraggio da parte del dispositivo di prova. Tipiche dimensioni della piastra sono: larghezza non inferiore a 45 mm,

spessore non superiore a 6 mm. Sulla faccia a contatto con il composito è consigliata la presenza di scanalature atte a migliorare l'aderenza.



**Figura 3.5.2 : Prova di strappo a taglio di tipo “indiretto”**

Per entrambi i tipi di prova, la lunghezza della porzione di FRP incollata deve risultare non inferiore a 200 mm nel caso di strutture di C.A. ed in ogni caso non inferiore a 1.1 volte la lunghezza ottimale di ancoraggio del rinforzo di FRP.

La qualità dell'incollaggio e della preventiva preparazione della superficie di applicazione possono ritenersi accettabili se almeno l'80% delle prove (almeno due su tre nel caso di sole tre prove) forniscono una forza di strappo di intensità non inferiore all'85% del valore della forza massima di aderenza caratterizzante il sistema di rinforzo studiato.

### 3.5.1.2 Prove non distruttive

L'intervento di rinforzo è da ritenersi non collaudabile in presenza di difetti di incollaggio equivalenti ad imperfezioni cilindriche di altezza e di diametro superiori, rispettivamente, a 0.5 e 25 mm. Per le situazioni più ricorrenti, sono esposti in forma tabellare valori consigliati delle dimensioni della maglia di mappatura e del diametro del difetto che la prova non distruttiva è in grado di rilevare.

Trasferimento di tensioni tangenziali all'interfaccia	Tipo di applicazione	Controllo non distruttivo	Dimensioni della maglia di mappatura (mm)	Diametro minimo del difetto rilevabile (mm)
Assente	confinamento, con eccezione della zona di sovrapposizione nel caso di realizzazioni a singolo strato	facoltativo	250	3
Debole	zona centrale di rinforzi bidimensionali molto estesi	facoltativo	250	3
Moderato o potenziale	zona centrale di rinforzi monodimensionali a flessione	consigliato	100	0.5
Critico	zone di ancoraggio, zone di sovrapposizione tra strati, rinforzo a taglio, zone di interfaccia con connettori, zone con vistose asperità o fessurazioni del substrato	obbligatorio	50	0.1

*Prove di tipo acustico stimolato:* Si basano sul diverso comportamento oscillatorio dello strato di composito in presenza o in assenza di adesione con il substrato sottostante. Nella sua versione più elementare, la prova può essere eseguita da un tecnico esperto percuotendo la superficie del composito con una bacchetta rigida ed ascoltando la sonorità che scaturisce dall'impatto. Risultati più oggettivi possono essere ottenuti con sistemi automatizzati.

*Prove ultrasoniche ad alta frequenza:* Devono essere eseguite impiegando metodologie in riflessione con frequenze non inferiori a 1.0 MHz e sonde con diametro non superiore a 25 mm. Per la localizzazione dei difetti è consigliata la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco.

*Prove in emissione acustica:* Consentono di rilevare la presenza di difetti di incollaggio all'interno di un elemento strutturale caricato e di seguirne l'evoluzione, "ascoltando" e registrando i "rumori" generati dalla propagazione della decoesione tra substrato e rinforzo.

### *3.5.2 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo*

L'attuale esigua disponibilità di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi consiglia, in situazioni di particolare rilevanza (con riferimento alla destinazione d'uso della struttura sulla quale si è intervenuti, al numero di elementi rinforzati e all'entità degli incrementi di resistenza conseguiti), un adeguato monitoraggio delle applicazioni. Esso può consistere nell'esecuzione periodica di prove sia non distruttive che semi-distruttive, o di prove mediante sensori incorporati. Lo scopo è quello di tenere sotto controllo i seguenti parametri [6].

- Temperatura del rinforzo;
- Umidità dell'ambiente;
- Andamento di spostamenti e deformazioni;
- Continuità e livello di danneggiamento delle fibre;
- Estensione dei difetti di incollaggio.

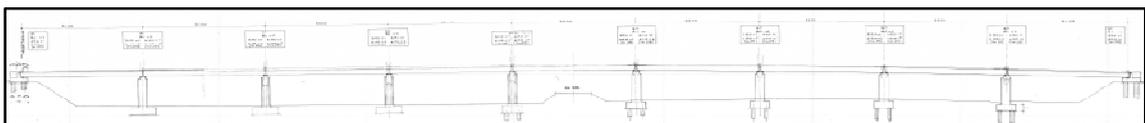
# RESTAURO E ADEGUAMENTO STATICO DI UN PONTE CON STRESSHEAD-CARBOSTRESS POST-TENSIONING SYSTEM

Di seguito verrà illustrata l'applicazione dell'innovativo sistema di precompressione esterna "StressHead-CarboStress post-tensioning system" al caso del ripristino di un viadotto costruito alla fine degli anni '80 in una zona non sismica e progettato per portare, oltre ai pesi propri ed ai carichi permanenti, i carichi mobili previsti all'epoca della costruzione. Il ripristino ed adeguamento statico s'è reso necessario a causa della presenza di fessure anomale nelle travi a sezione piena del ponte, che a seguito dell'esecuzione di indagini approfondite, hanno rivelato una perdita di precompressione dei cavi interni di post-tensione corrispondente all'ammaloramento di due di essi diventati pertanto inefficaci.

Il ponte di cui sopra è stato oggetto di studio da parte della Società di Ingegneria ENARCH S.r.l. di Torino, presso la quale ho svolto la presente Tesi di Laurea, approfondendo gli aspetti qui trattati.

### 4.1 Caratteristiche del ponte

Il viadotto in esame presenta una doppia carreggiata separata realizzata con impalcati isostatici aventi sezione a piastra piena ad altezza costante; i singoli impalcati sono appoggiati in corrispondenza delle spalle e di tutte le pile intermedie. L'impalcato si sviluppa su 9 campate di lunghezza complessiva pari a 35 m e luce appoggi di 33.9.

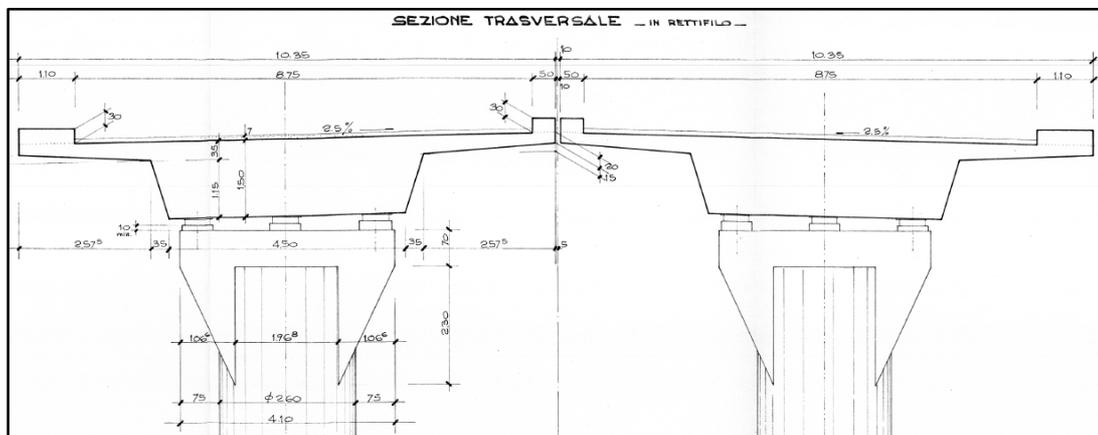


*Figura 4.1.1 : Viadotto a 9 campate*

I vincoli di tutte le campate sono tali da garantire uno schema isostatico mediante vincolo mobile ad una delle estremità e vincolo fisso all'estremità opposta.

Le 8 pile, su cui risulta appoggiato l'impalcato, sono realizzate in cemento armato ordinario con un'altezza media pari a 4 m e presentano una sezione circolare con diametro di 2.6 m dalla cui estremità superiore si apre un pulvino in grado di ospitare i tre dispositivi di appoggio che sono in acciaio e teflon e realizzano l'allineamento trasversale vincolato. Le due spalle supportano gli appoggi terminali dell'impalcato.

I singoli impalcati delle due carreggiate presentano la stessa sezione trasversale a piastra piena, che si ripropone in tutte le campate del viadotto.



**Figura 4.1.2 : Sezione trasversale del viadotto. In vista le due carreggiate**

Le caratteristiche geometriche della sezione trasversale del singolo impalcato sono le seguenti:

- Piastra piena nella zona centrale all'impalcato di larghezza costante, pari a 4.5 m che si allarga fino a 5.2 m all'attacco degli sbalzi laterali di soletta;
- Altezza della piastra costante pari a 1.5 m nella zona centrale che si riduce a 0.35 in corrispondenza degli attacchi degli sbalzi laterali;
- Sbalzi laterali di spessore variabile da un massimo di 35 cm in corrispondenza dell'attacco alla piastra centrale ad un minimo di 20 cm in corrispondenza dell'estremità su cui trova alloggiamento il cordolo laterale;
- Lunghezza degli sbalzi costante e pari a 2.575 m che permette di ospitare una carreggiata superiore di larghezza complessiva pari a 10.35 m, di cui 8.75 m pavimentati.

In ciascuna campata sono presenti cavi di precompressione post-tesa; la precompressione da progetto risulta realizzata mediante 14+14 tracciati di cavi simmetrici rispetto alla mezzeria dell'impalcato, i quali presentano ad una estremità una testata morta realizzata mediante cappio annegato nel getto della piastra ed una testata a tendere all'altra estremità. Ciascuno dei 28 tracciati è realizzato mediante impiego di un cavo da 12 trefoli di diametro 15.24 mm.

A seguito dei danneggiamenti manifestatisi ad intradosso di alcuni impalcati ed alle successive ispezioni mirate ad individuarne la causa, è stato rilevato un degrado dei cavi di post-tensione tale da comportare nelle campate maggiormente colpite (campate 4 e 9) la perdita integrale di 2 cavi.

## **4.2 Campagna di indagini e di prove**

Nel corso delle periodiche attività di monitoraggio dell'opera, sono state riscontrate delle fessure lungo l'intradosso del cassone degli impalcati delle campate 4 e 9 del viadotto. Al fine di stabilire le cause degli ammaloramenti individuati, è stata avviata una approfondita campagna di prove e di analisi che si descrive nel seguito.

### *4.2.1 Saggi esplorativi*

Da un primo esame visivo, si è potuto constatare che non si trattava di un semplice distacco di copriferro: non sono infatti state rinvenute macchie di umidità, degrado del calcestruzzo o altri segni tipici di tali inconvenienti. Il fenomeno riscontrato non derivava quindi da "normale" degrado del materiale. In seguito all'esame visivo si è proceduto alla demolizione controllata della porzione di calcestruzzo nell'intorno delle fessure, fino a raggiungere la guaina dei cavi di precompressione. Con l'occasione si è immediatamente constatato il buon stato di conservazione del calcestruzzo; le fessure, quindi, sono state causate da una "spinta" dall'interno, dovuta ad un aumento di volume della guaina messa in opera per la protezione dei cavi nella direzione del calcestruzzo posto al di sotto di quest'ultima. Passo successivo delle indagini è stato quello di determinare lo stato di deterioramento dei cavi, esaminando i trefoli costituenti gli stessi. Per fare ciò si è estesa la zona di ricerca lungo lo sviluppo delle fessure, andando a scoprire le guaine. Si è constatato

come alcuni trefoli di singoli cavi risultassero laschi e dunque non più efficaci. Per determinare il numero di trefoli componenti i cavi, si è sfruttata la presenza del cavo sicuramente non più efficace, andando a verificarne il numero in una sezione non ancora compromessa dal degrado. I trefoli componenti sono risultati 12, da 15.24 mm di diametro, in accordo con il progetto.



*Figura 4.2.1 : Demolizione controllata del calcestruzzo lungo le fessure*



*Figura 4.2.2 : Scoprimo della guaina*

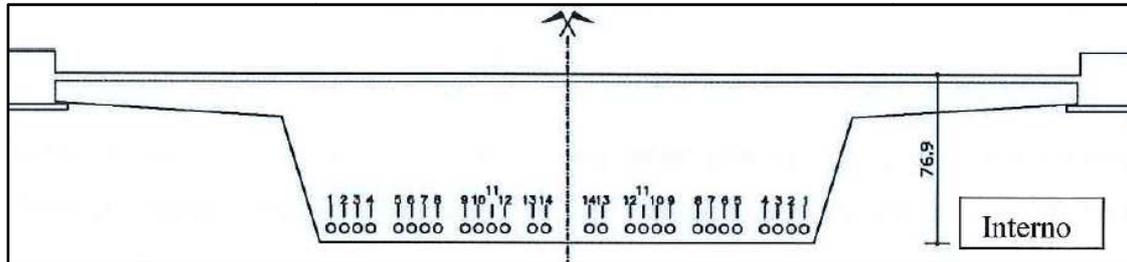


*Figura 4.2.3 : Trefoli laschi*



*Figura 4.2.4 : Verifica del numero di trefoli*

Per comodità di indagine si è schematizzata la distribuzione dei cavi all'interno dei cassoni, numerando i cavi dal numero 1 al numero 14 a partire dall'esterno verso l'interno tenendo l'asse longitudinale del cassone come asse di simmetria.



**Figura 4.2.5 : Numerazione schematica dei cavi per facilità di individuazione durante i saggi esplorativi**

In particolare, nell'impalcato della carreggiata sud, nella *campata 4* sono state evidenziate quattro fessure longitudinali, due in corrispondenza della porzione di cassone esterna e due in corrispondenza di quella interna.

Lato Interno:

- Fessura 1: in corrispondenza del cavo 10 e 11. Il cavo 10 è stato trovato in buon stato, la guaina si trovava localmente intaccata ed i trefoli costituenti il cavo erano ancora protetti ed in tensione. Il cavo 11, invece, risultava inefficace.
- Fessura 2: in corrispondenza del cavo 3. La guaina era completamente deteriorata ed i trefoli risultavano fortemente degradati, seppure al momento ancora in tensione.

Lato Esterno:

- Fessura 3: in corrispondenza del cavo 13. La guaina è stata trovata localmente deteriorata ed i trefoli più esterni erano degradati ma risultavano ancora in tensione.
- Fessura 4: in corrispondenza del cavo 7. I trefoli costituenti il cavo erano protetti ed in tensione.

Tutti gli altri trefoli indagati risultavano protetti.

Inoltre, nello stesso impalcato, nella *campata 9* sono state evidenziate quattro fessure longitudinali, due in corrispondenza della porzione di cassone esterna e due in corrispondenza di quella interna.

Lato Interno:

- Fessura 1: in corrispondenza dei cavi 3,4,5,6,7,8. I cavi 3,4,5,8 sono stati trovati in buon stato, i trefoli erano protetti ed in tensione. Il cavo 7, invece, aveva la guaina completamente deteriorata ed i trefoli esterni in condizioni di incipiente degrado ma ancora in tensione. Il cavo 6 aveva i trefoli esterni leggermente intaccati ma in tensione.
- Fessura 2: in corrispondenza dei cavi 5,6,7,8. I cavi 5,6,8 erano in buon stato, avevano la guaina leggermente intaccata. Il cavo 7, invece, aveva la guaina compromessa ed i trefoli esterni sensibilmente degradati ma in tensione.

#### Lato Esterno:

- Fessura 3: in corrispondenza dei cavi 5,6,7,8. Tutti i cavi risultavano in ordine.
- Fessura 4: in corrispondenza dei cavi 9,10,11,12. I cavi 10 e 12 avevano i trefoli esterni leggermente intaccati ma in tensione. Il cavo 11 aveva la guaina compromessa ed i trefoli esterni sensibilmente degradati ma in tensione. Il cavo 9 aveva i trefoli protetti ed in tensione.

Tutti gli altri trefoli indagati risultavano protetti.

In conclusione, dai saggi esplorativi effettuati sui cavi di precompressione si è potuto constatare che nella *campata 4* dell'impalcato sud il cavo 11 del lato interno era inefficace ed il cavo 3 del lato interno presentava i trefoli fortemente degradati con probabile perdita di tensione in breve tempo. Inoltre, si è constatato che nella *campata 9* dell'impalcato sud il cavo 7 si trovava in condizioni di incipiente degrado con probabile perdita di tensione in breve periodo.

I cavi di precompressione avevano evidentemente subito un ammaloramento imprevisto ed imprevedibile in origine, indipendente dalla buona condotta del lavoro svolto al tempo di realizzazione dell'opera; infatti una cattiva realizzazione avrebbe determinato una maggiore diffusione del problema riscontrato, che, invece, era di carattere puntuale, visto che interessava un numero estremamente ridotto di cavi rispetto al totale presente all'interno di ciascun cassone. Entrando più nello specifico, si è constatato che l'iniezione con boiacche cementizie eseguita per la protezione dei singoli cavi 11 e 3 nella *campata 4* e 7 nella *campata 9* non era stata uniforme ed omogenea rispetto al complessivo sviluppo della guaina; tale iniezione infatti, era rinvenuta al momento delle indagini con puntuali discontinuità. Inoltre, nella tratta in cui il cavo presentava la propria massima concavità si era concentrata dell'acqua, presumibilmente già durante la fase esecutiva, che nei periodi invernali, in presenza

delle basse temperature tipiche della zona in cui si situa l'opera, aveva determinato l'instaurarsi di cicli di gelo e disgelo, con conseguente aumento di volume, danneggiamento dei singoli trefoli ed espulsione del calcestruzzo. Il danneggiamento dei cavi era proprio nella parte centrale delle campate, dove il ricoprimento risultava minimo; la restante parte dei cavi, infatti, risultava sempre protetta dall'importante massa di calcestruzzo costituente il cassone. Una volta espulso il calcestruzzo e rotta la guaina la situazione era stata ulteriormente peggiorata determinando le condizioni di ammaloramento riscontrate in situ.

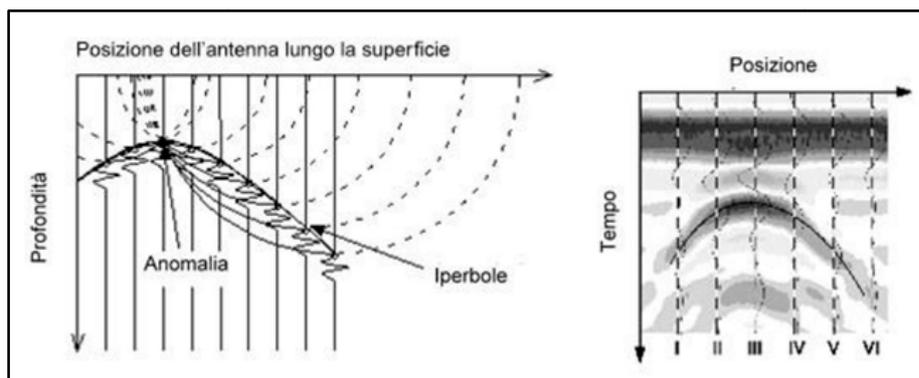
#### *4.2.2 Indagini radar*

Per conoscere interamente la posizione dei cavi di precompressione esaminati durante i saggi esplorativi, è stata eseguita un'indagine geofisica. In particolare sono stati individuati i tracciati dei 28 cavi di precompressione della campata 4 dell'impalcato sud. A tale scopo sono stati acquisiti 5 profili radar in direzione ortogonale allo sviluppo della campata in porzioni apparentemente non danneggiate. La posizione delle guaine metalliche sezione per sezione desunta dai radargrammi ha confermato i tracciati di progetto dei 28 cavi di precompressione.

La tecnica georadar (Ground Penetration Radar - GPR) permette di studiare il sottosuolo e le opere di ingegneria civile attraverso l'analisi delle modalità di propagazione delle onde elettromagnetiche con lunghezza di alcune decine di centimetri. Le onde elettromagnetiche vengono immesse, riflesse e ricevute al fine di acquisire informazioni sullo stato fisico esistente nei materiali indagati. Le modalità di propagazione delle onde elettromagnetiche sono strettamente legate alle costanti dielettriche dei materiali. Le caratteristiche dielettriche derivano dallo stato fisico dei materiali (densità, porosità, permeabilità, conducibilità etc.), pertanto tutte le interfacce separanti mezzi con caratteristiche diverse possono essere individuate in modo tanto più certo quanto più alto è il contrasto fisico. La tecnica radar per riflessione permette di individuare la presenza di variazioni della costante dielettrica del mezzo indagato. Tali variazioni si manifestano come riflessioni organizzate del segnale radar impulsivo e possono essere originate, per esempio, da cambi di litologia, interfacce tra materiali con caratteristiche differenti, discontinuità strutturali, cavità, ferri di armatura, oggetti metallici, sotto-servizi, strutture sepolte.

Nel caso in esame è stato possibile rilevare le armature presenti e i cavi di precompressione e valutare l'estensione dei fenomeni di degrado del calcestruzzo.

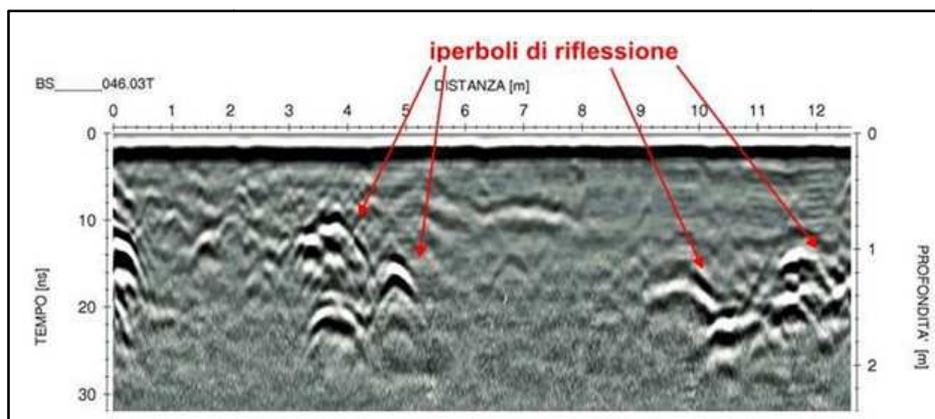
Attraverso un'antenna, che è al contempo un dispositivo trasmittente e ricevente, viene inviata nel mezzo di indagine una serie di impulsi di energia elettromagnetica caratterizzati da una brevissima durata (qualche nanosecondo) e da un'elevata cadenza di emissione (decine di kHz). In corrispondenza di discontinuità una parte dell'energia immessa viene riflessa e captata dalla sezione ricevente dell'antenna mentre un'altra parte penetra ulteriormente per essere riflessa da una superficie sottostante. Gli impulsi riflessi vengono rilevati per un tempo prestabilito e trasformati in segnali elettrici. L'antenna viene trascinata lungo una linea di prospezione, contemporaneamente al movimento i segnali elettrici (echi radar) vengono registrati su un computer, elaborati e riprodotti graficamente in sezioni definite in ordinata dai tempi di analisi del segnale riflesso e in ascissa dalle distanze riferite al punto di inizio della prospezione. Una discontinuità delle proprietà dielettriche verrà riprodotta come una successione affiancata di echi riflessi. Un allineamento continuo di echi è sintomo di una discontinuità che percorre la sezione ad una certa profondità. Nel caso di anomalia circoscritta la successione di echi di riflessioni andrà a delineare la forma caratteristica di un'iperbole, come dimostra la seguente figura.



**Figura 4.2.6 : Rilievo di una anomalia tramite metodo radar**

I parametri che maggiormente influenzano l'accuratezza dell'indagine radar sono la massima profondità d'investigazione e il potere risolutivo. Poiché la frequenza influisce sia sul potere risolutivo sia sulla profondità di investigazione, le antenne ad

alta frequenza (1000 MHz) sono impiegate per la ricerca di piccole anomalie poco profonde e le antenne a bassa frequenza (80 MHz) per la prospezione di anomalie più importanti e profonde. Tipicamente se si indaga il calcestruzzo con un'antenna di 1000 MHz si potrà ottenere una risoluzione di 5 cm ed una profondità di investigazione dell'ordine di 30 cm o meno in base al grado di umidità del calcestruzzo in esame. La penetrazione degli impulsi radar è infatti molto più grande nei materiali resistivi che in quelli conduttivi: per la stessa frequenza può essere inferiore al metro in sabbie argillose e di alcune decine di metri in calcari compatti.



**Figura 4.2.7 : Esempio di profilo georadar eseguito in presenza di opere sepolte, rilevate da riflessioni del segnale che appaiono in forma di iperboli**

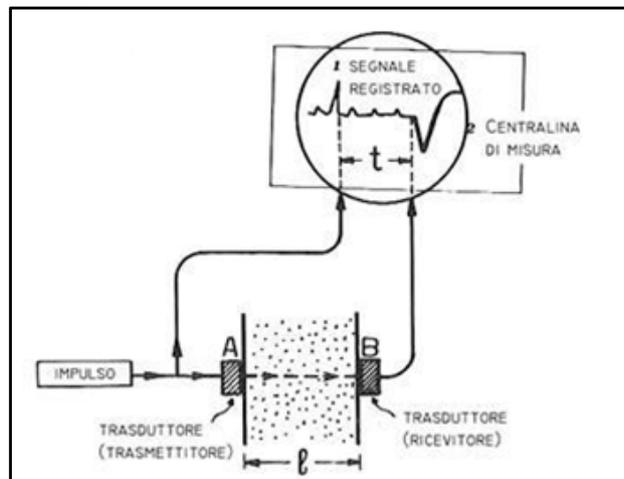
#### 4.2.3 Prove per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo

**Metodo Sonreb:** Prove sclerometriche e prove ultrasoniche.

Le prove sclerometriche vengono eseguite utilizzando uno sclerometro per calcestruzzo calibrato. La stima si basa sulla misura della durezza superficiale del materiale da testare, la quale è rapportata all'indice di rimbalzo dello strumento. Per ogni punto di prova sono state eseguite 12 battute non sovrapposte (è sbagliato effettuare più battute sullo stesso identico punto fisico) e sono stati eliminati i valori massimo e minimo. I risultati delle prove eseguite vengono espressi in termini di resistenza cubica a compressione  $R_{c,s}$ . Sono state eseguite, anche, 10 misure di velocità sonica. L'indagine ultrasonica viene condotta utilizzando due trasduttori di misura, un trasmettitore ed un ricevitore, posizionati su due punti del manufatto in esame. Ogni misura consiste nella determinazione della velocità di propagazione

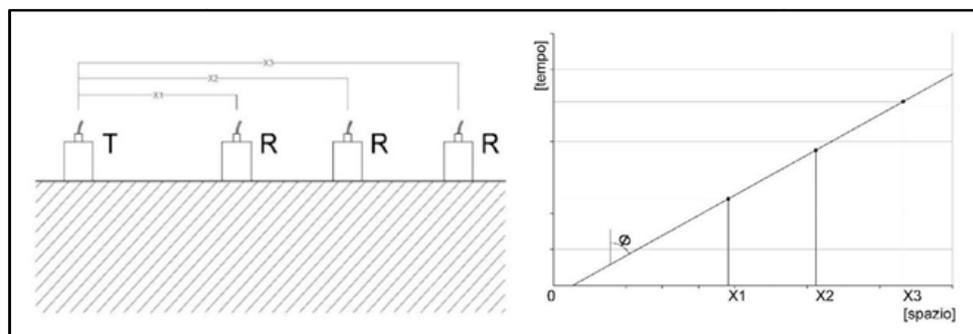
dell'onda sonora, intesa come rapporto tra la distanza che separa i due trasduttori ed il tempo impiegato dall'onda sonora per raggiungere il ricevitore. Le misure soniche possono essere eseguite con le seguenti modalità:

- Metodo diretto: posizionando i trasduttori (trasmettitore e ricevitore) sulle due superfici contrapposte



**Figura 4.2.8 : Metodo diretto di misure soniche**

- Metodo indiretto: posizionando i trasduttori (trasmettitore e ricevitore) sulla stessa superficie. Per l'esecuzione delle misure viene tenuta fissa la posizione dell'emettitore mentre viene variata la posizione del ricevitore. I valori dei tempi di trasmissione registrati vengono diagrammati in funzione della distanza che separa i trasduttori.



**Figura 4.2.9 : Metodo indiretto di misure soniche**

Nel caso in esame le misure sono state eseguite con metodo diretto. La zona prescelta per l'esecuzione della prova è stata accuratamente ispezionata mediante pacometro allo scopo di evitare di eseguire la prova sonica in corrispondenza di una sezione di

calcestruzzo con presenza di ferri di armatura. Il pacometro sfrutta le proprietà magnetiche del ferro per la localizzazione delle armature. Lo strumento consiste in una sonda emettitrice di campo magnetico collegata ad una unità di elaborazione digitale ed acustica. La sonda è fatta scorrere lungo la superficie della membratura in calcestruzzo armato e dall'assorbimento del campo magnetico si è in grado di determinare la posizione delle armature, lo spessore del copriferro e, con buona approssimazione, il diametro dei ferri.

Avendo eseguito le prove sclerometriche e ultrasoniche, il valore della resistenza a compressione del calcestruzzo  $f_{c,s}$  viene determinata mediante metodo combinato Sonreb, mediante correlazione tra misure di velocità sonica e indice sclerometrico del tipo  $f_{c,s} = a V^b S^c$ , ove  $V$  è la velocità sonica e  $S$  l'indice sclerometrico.

*Prova di carbonatazione:* indica lo stato in cui si trova il calcestruzzo. Il test viene eseguito bagnando una superficie di frattura fresca con una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcol etilico. La fenolftaleina è un indicatore di basicità mediante il quale si individua la parte del campione che ha  $pH > 8$ . Al di sotto di questa soglia si ritiene che il campione presenti carbonatazione.

In particolare nel caso in esame le prove sono state eseguite mediante metodo carbontest, il quale consiste nell'analizzare la carbonatazione mediante l'esecuzione del test alla fenolftaleina sulla polvere raccolta in una provetta durante una perforazione nel calcestruzzo con tassellatore. Le fasi dell'indagine sono le seguenti: ispezione della zona d'indagine mediante pacometro allo scopo di evitare d'intercettare i ferri di armatura durante la perforazione; posizionamento di apposito strumento di raccolta completo di provetta di accumulo sulla superficie della struttura in calcestruzzo ed esecuzione di una perforazione mediante tassellatore con punta di diametro 10 mm; esecuzione di test alla fenolftaleina facendo penetrare il composto in un'apposita fessura longitudinale della provetta. Durante il test vengono eseguite le seguenti misurazioni:

- PP: misura della quantità di polvere nella provetta;
- PF: misura della profondità del foro;
- CM: misura della profondità di carbonatazione sulla provetta.

Il valore della profondità reale di carbonatazione  $CR$  è pari a:

$$CR = \frac{PF}{PP} \cdot CM$$

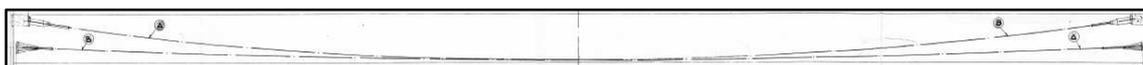
### 4.3 Caratterizzazione meccanica della trave danneggiata

Per il recupero della precompressione persa e l'intervento di rinforzo della singola campata (campata 4), inizialmente si provvede alla caratterizzazione meccanica della trave a cassone.

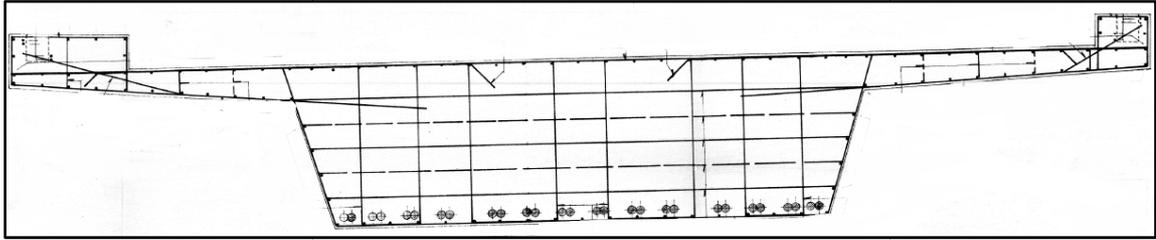
Dall'indagine Sonreb e dalla prova di carbonatazione si è ottenuta la resistenza caratteristica del calcestruzzo ( $R_{ck}$ ) pari a 40 MPa e si è rilevata la profondità dello strato carbonatato di pochi millimetri. Entrambi i risultati indicano un buon stato di conservazione della struttura.

I rilievi effettuati poi hanno confermato che i cavi di post-tensione sono composti da 12 trefoli di acciaio armonico di diametro di 15.24 mm. Allo scopo di valutarne la portanza si sono eseguite prove di trazione sui trefoli, dalle quali si è ricavato il valore della tensione caratteristica a rottura dei trefoli ( $f_{ptk}$ ) pari a 1800 MPa, valore tipico per l'acciaio armonico per cavi di post-tensione utilizzato al momento della realizzazione dell'opera. La tensione in esercizio ammessa per questo tipo di armatura era al suo tempo pari a  $0.6f_{ptk}$ , in base alle normative vigenti all'epoca della progettazione dell'opera, e pertanto è ragionevole considerare una tensione di precompressione nel singolo trefolo pari a 1050 MPa ed uno sforzo massimo di precompressione nel cavo ( $N_{cavo}$ ) pari a 1751.4 kN ( $n_{trefoli} \cdot A_{trefolo} \cdot 1050$ ).

Come operazione complementare alla caratterizzazione meccanica della trave, il rilievo GPR ha verificato la posizione dei 28 cavi di post-tensione (ved. Allegato B) e delle armature lente lungo il cassone danneggiato.



*Figura 4.3.1 : Tracciati dei cavi di post-tensione*



**Figura 4.3.2 : Disposizione dei cavi e delle armature lente nella sezione trasversale di mezzeria**

#### **4.4 Modellazione del ponte agli elementi finiti**

Al fine di valutare in termini di stato tensionale sia il danno subito dalla trave che l'efficacia dell'intervento di ripristino, sia la perdita di precompressione dovuta alla perdita di efficacia col tranciamento dei cavi di post-tensione che il recupero di essa con l'intervento di rinforzo, si è modellato il ponte dapprima nella situazione originaria progettuale, successivamente nella situazione attuale di danneggiamento con la rottura dei due cavi di post-tensione, ed in ultimo si è modellato l'intervento di rinforzo con l'aggiunta delle lastre pretese.

Nel ponte d'interesse si è utilizzato un modello agli elementi finiti discretizzando la struttura con elementi tipo *beam* ossia con elementi dotati di rigidità flessionale, mediante i quali si è provveduto a schematizzare la trave a cassone. Ho svolto la modellazione strutturale della trave precompressa con il software ad elementi finiti MIDAS CIVIL, della Midas Information Technology Co., LTD, distribuito in Italia dalla Società HARPACEAS S.r.l. di Milano e messi a disposizione come "Copia Studente" dalla stessa società, nell'ambito della mia tesi svolta in azienda e nell'ambito del precedente stage curriculare già svolto presso ENARCH S.r.l. Tramite il supporto dei tecnici di ENARCH S.r.l. ho potuto apprendere l'utilizzo di tale software specialistico, utilizzato all'interno della loro struttura.

La combinazione delle azioni è stata effettuata secondo quanto disposto dalla normativa per la progettazione dei ponti stradali. Anche le verifiche sono state condotte secondo quanto prescritto dalla normativa con il metodo degli stati limite.

#### 4.4.1 Azioni agenti sull'impalcato

Tra le *azioni permanenti* si considerano il peso proprio dell'impalcato, calcolato automaticamente dal software assegnando alla trave ed ai cavi di post-tensione il *materiale* e la *sezione*, la precompressione esercitata sulla trave da ciascun cavo, calcolata in precedenza a partire dalla resistenza a rottura dei trefoli, e i carichi permanenti portati. I carichi permanenti portati sono la pavimentazione con 26.25 kN/m, i cordoli laterali con 14.02 kN/m e le barriere di sicurezza con 10.00 kN/m.

Come *azione variabile* sulla struttura si considera il carico mobile veicolare. Per massimizzare gli effetti di tali carichi sulla struttura, l'impalcato è stato caricato secondo lo Schema di Carico 1 (D.M. 14/01/2008). Data la geometria della sede stradale, sono state considerate due corsie di larghezza pari a 3.0 m, in cui sono presenti sia il sistema Tandem TS che il carico uniforme UDL, ed una parte rimanente di 2.75 m di larghezza, in cui è stato considerato il solo carico UDL, in accordo con le indicazioni fornite nella Tabella e nella Figura seguenti.

Posizione	Carico asse $Q_{ik}$ [kN]	$q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Corsia Numero 1	300	9,00
Corsia Numero 2	200	2,50
Corsia Numero 3	100	2,50
Altre corsie	0,00	2,50

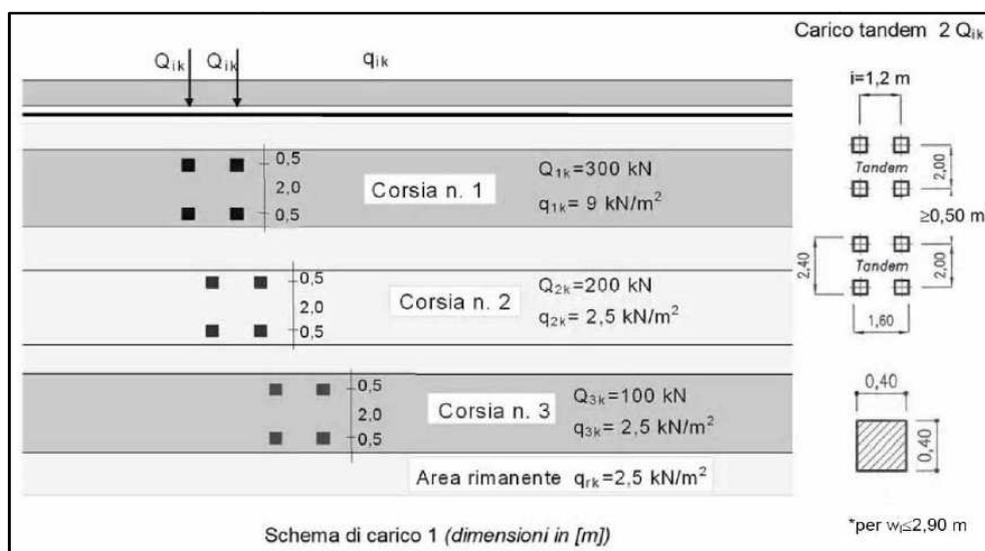
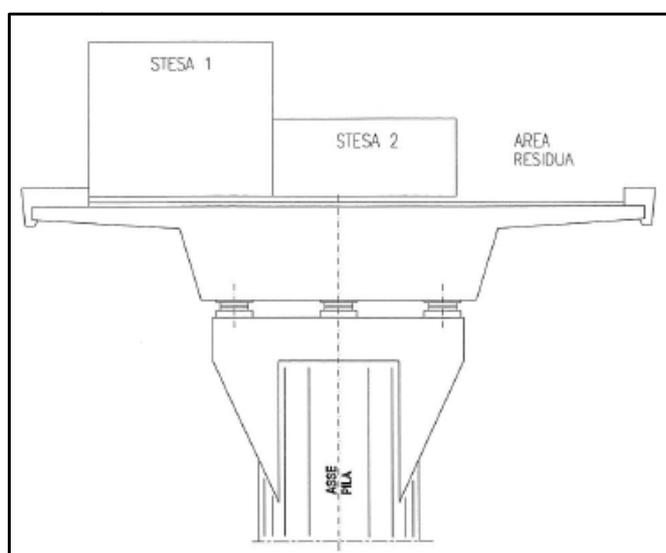


Figura 4.4.1 : Schema di carico 1 - Schema generale

Gli effetti del carico mobile sono stati valutati analizzando lo schema unifilare e calcolando quindi su questo le sollecitazioni prodotte tanto dalle forze concentrate degli assi tandem (TS) che dal carico distribuito (UDL) considerati agenti con piena intensità. Al fine delle analisi che sono state condotte la posizione longitudinale dei carichi è stata individuata, tramite il software di calcolo, in modo da massimizzare gli effetti flessionali nella sezione più sfavorevole (mezzeria) e quindi concentrando i carichi TS nella zona centrale dell'impalcato con carichi distribuiti UDL su tutta la luce.



**Figura 4.4.2 : Disposizione trasversale delle corsie di traffico**

#### 4.4.2 Combinazioni delle azioni

In accordo con le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, vengono utilizzate le seguenti combinazioni delle azioni:

- Combinazione Fondamentale, SLU  
 $\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione Caratteristica (rara), SLE  
 $G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione Frequente, SLE  
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione Quasi Permanente, SLE  
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$

Dove:

$G_1$  azioni permanenti, peso proprio di tutti gli elementi strutturali

$G_2$  azioni permanenti, peso proprio di tutti gli elementi non strutturali

P azioni permanenti, precompressione

Q azioni variabili

Ai fini della determinazione dei valori caratteristici delle azioni dovute al traffico è stata considerata la seguente Tabella riportata dalla normativa.

Carichi sulla carreggiata		
	Carichi Verticali	Carichi Orizzontali
Gruppo di Azioni da Traffico	Modello principale (Schemi di Carico 1 e 2)	Frenatura
<b>1</b>	Valore caratteristico	
<b>2a</b>	Valore frequente	Valore caratteristico
<b>2b</b>	Valore frequente	

Le azioni orizzontali non producono sollecitazioni significative per le analisi che sono state condotte e quindi sono state trascurate nel calcolo.

I valori dei coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico a SLU sono riportati nella Tabella seguente.

Carichi	Effetti	Coefficiente Parziale	EQU	STR (A1)	GEO (A2)
Carichi Permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.90	1.00	1.00
	sfavorevoli		1.10	1.35	1.00
Carichi Permanenti non strutturali (compiutamente definiti)	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.90	1.00	1.00
	sfavorevoli		1.10	1.35	1.00
Carichi Variabili da Traffico	favorevoli	$\gamma_Q$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.35	1.35	1.15
Carichi Variabili	favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.50	1.50	1.30
Variazioni Termiche	favorevoli	$\gamma_E$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.20	1.20	1.00
Precompressione	favorevoli	$\gamma_P$	1.00	1.00	1.00
	sfavorevoli		1.00	1.00	1.00

I valori dei coefficienti di combinazione per le combinazioni di carico a SLU e a SLE sono riportati nella tabella seguente.

Azioni	Gruppo di Azioni		$\psi_{0i}$	$\psi_{1i}$	$\psi_{2i}$
Gruppo di Azioni da Traffico	1	Schema di Carico 1 (carichi concentrati)	0.75	0.75	0.00
		Schema di Carico 1 (carichi distribuiti)	0.40	0.40	0.00
		Schema di Carico 2	0.00	0.75	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	

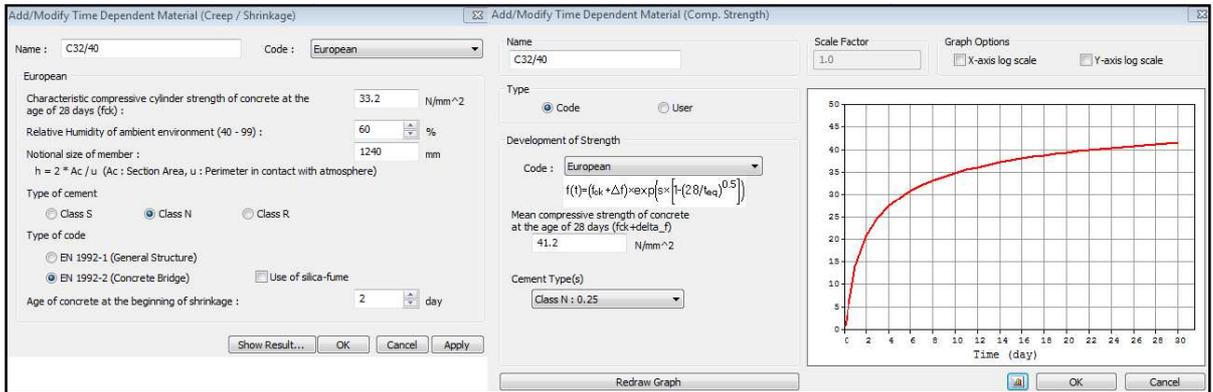
### 4.4.3 Modellazione della trave a cassone nella situazione originaria progettuale

Note le caratteristiche meccaniche della trave si definiscono i *materiali*, le proprietà meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio di precompressione.

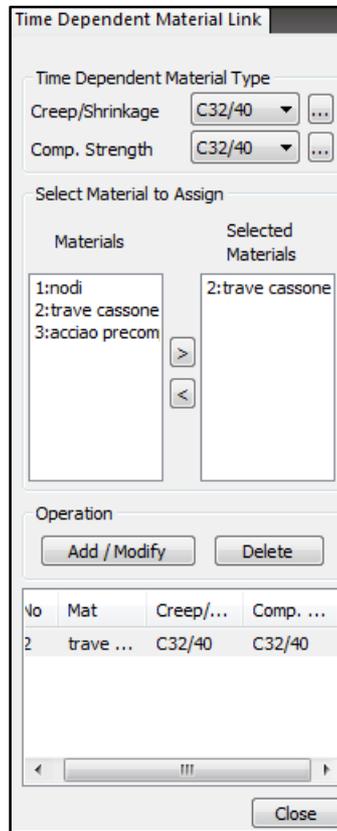
The image shows a software interface with two panels for defining material properties. The left panel is for 'Material ID 2' named 'trave cassone'. It is set to 'Concrete' design type. The 'Type of Material' is 'Isotropic'. The 'Steel' section is active, showing a Modulus of Elasticity of 0.0000e+000 N/mm<sup>2</sup>, Poisson's Ratio of 0, Thermal Coefficient of 0.0000e+000 1/[F], and Weight Density of 0 N/mm<sup>3</sup>. The 'Concrete' section is also active, showing a Modulus of Elasticity of 3.3345e+004 N/mm<sup>2</sup>, Poisson's Ratio of 0.2, Thermal Coefficient of 5.5556e-006 1/[F], and Weight Density of 2.5e-005 N/mm<sup>3</sup>. The right panel is for 'Material ID 3' named 'acciaio precomp'. It is set to 'Steel' design type. The 'Type of Material' is 'Isotropic'. The 'Steel' section is active, showing a Modulus of Elasticity of 1.9500e+005 N/mm<sup>2</sup>, Poisson's Ratio of 0.3, Thermal Coefficient of 6.6667e-006 1/[F], and Weight Density of 7.698e-005 N/mm<sup>3</sup>. The 'Concrete' section is inactive. Both panels have 'Plasticity Data' set to 'NONE' and 'Thermal Transfer' properties set to 0. The 'Damping Ratio' is 0.05 for the concrete and 0.02 for the steel.

**Figura 4.4.3 : Proprietà meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio di precompressione**

Il calcestruzzo nel tempo subisce i fenomeni reologici di fluage e di ritiro e incrementa la sua resistenza. Questo aspetto è stato tenuto in conto nel modello creando un *Time Dependent Material*. In realtà sono stati creati due materiali le cui proprietà dipendono dal tempo, uno che subisce solo fluage e ritiro e l'altro che incrementa la sua resistenza. Entrambi i materiali, infine, sono stati uniti mediante un *Time Dependent Material Link*. Per gli effetti dovuti al tempo si è fatto riferimento alle normative europee EN 1992-2 (Concrete Bridge).

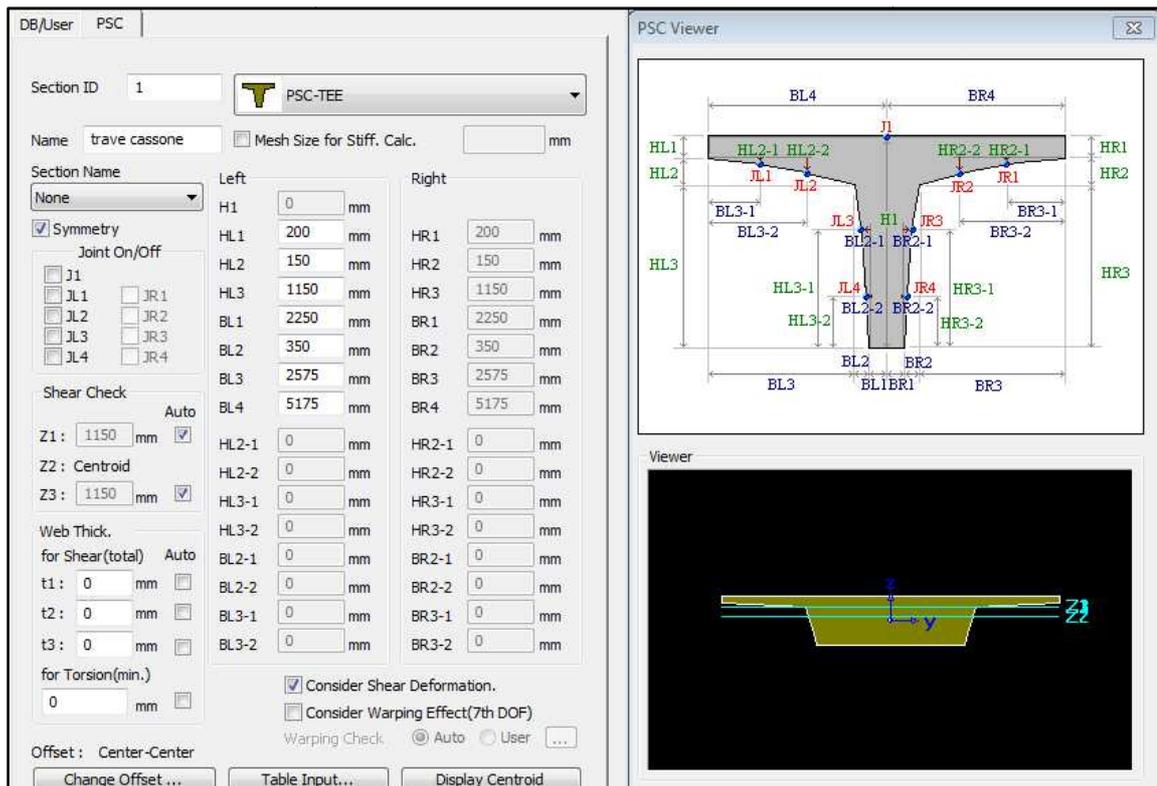


**Figura 4.4.4 : Time Dependent Material - calcestruzzo**



**Figura 4.4.5 : Time Dependent Material Link - calcestruzzo**

Successivamente è stata definita la *sezione* trasversale del cassone note le caratteristiche del ponte.



**Figura 4.4.6 : Sezione trasversale del cassone**

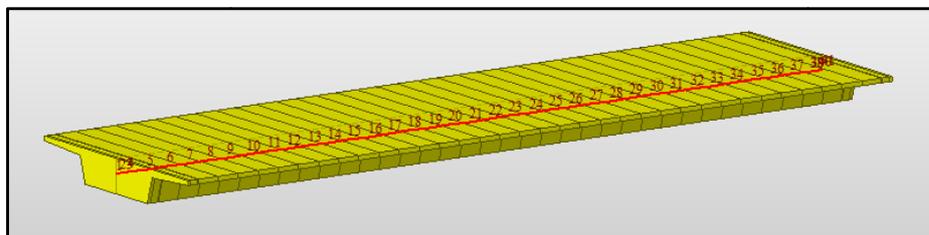
Il MIDAS CIVIL consente anche l'importazione di linee disegnate su Autocad. Si è preferito utilizzare il software CAD per disegnare l'asse della trave a cassone. Considerata la necessità di avere dei nodi in corrispondenza degli ancoraggi dei cavi di post-tensione e degli appoggi della trave e di suddividere la trave in conci uguali lunghi 1 m, si sono disegnate su CAD altre linee ortogonali all'asse della trave.



**Figura 4.4.7 : Linee disegnate su Autocad. In verde l'asse della trave**

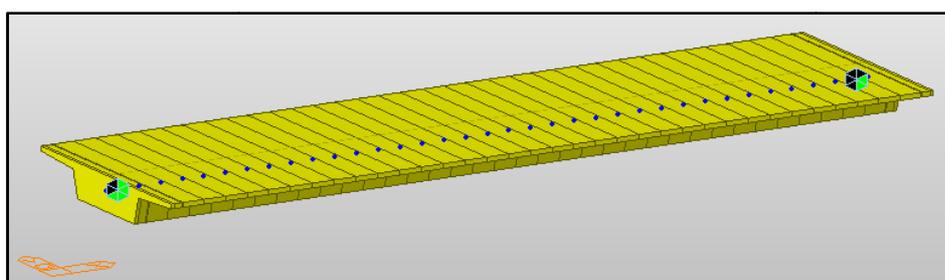
Al momento dell'importazione su MIDAS CIVIL delle linee disegnate su Autocad vengono assegnati ad ogni tipologia di linea il *materiale* e la *sezione*. Alle linee verticali sono stati assegnati generici materiale e sezione dal momento che sono state cancellate in seguito all'importazione, essendo state utili unicamente per la

generazione dei nodi nel punto della loro intersezione con l'asse della trave. Alla linea dell'asse della trave sono stati assegnati il materiale calcestruzzo e la sezione trasversale a piastra precedentemente definiti.

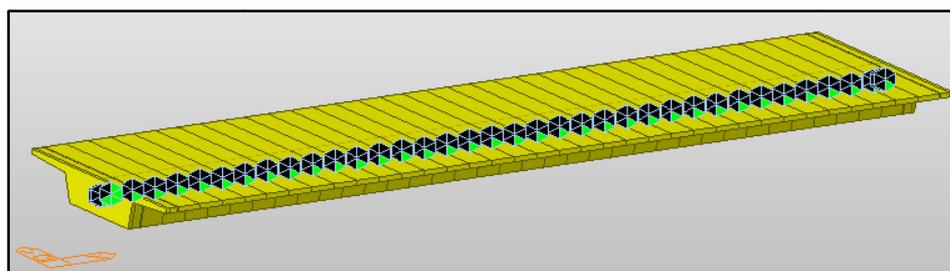


**Figura 4.4.8 : Asse della trave con assegnati materiale e sezione**

Definiti i nodi sono stati inseriti gli appoggi della trave, *boundaries supports*, creando un vincolo mobile ad una delle estremità ed un vincolo fisso all'estremità opposta. Essendo su MIDAS CIVIL l'asse x l'asse della trave, ad una delle estremità sono stati impediti gli spostamenti in direzione y e z mentre all'estremità opposta sono stati bloccati gli spostamenti in direzione x, y e z e la rotazione intorno all'asse x. E' stato creato anche un vincolo che rappresentasse il cassero al momento del getto della trave. Il vincolo *cassero* è stato applicato a tutti i nodi restanti della trave bloccando lo spostamento lungo z.

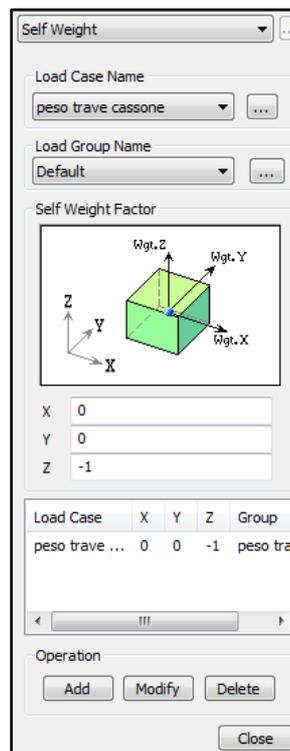


**Figura 4.4.9 : Vincoli di appoggio alle estremità della trave**

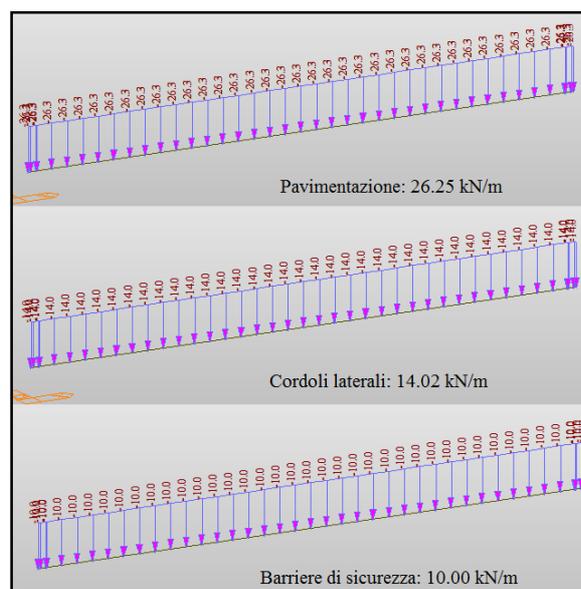


**Figura 4.4.10 : Vincoli di appoggio della trave alla fase di getto**

Di seguito sono stati inseriti i carichi statici, *Static Loads*. Il peso proprio del cassone è stato calcolato automaticamente dal software inserendo il carico *Self Weight*. I carichi permanenti portati (pavimentazione, cordoli laterali e barriere di sicurezza) sono stati definiti come *Line Beam Loads*, carichi uniformemente distribuiti.

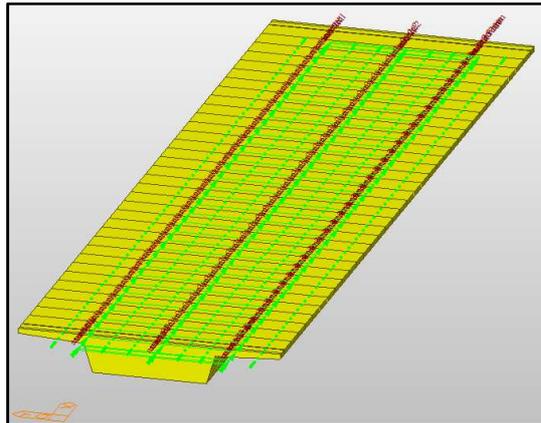


**Figura 4.4.11 : Carico permanente strutturale – peso proprio della trave**



**Figura 4.4.12 : Carichi permanenti portati**

I carichi variabili sono invece stati definiti come *Moving Load*. E' stato inserito l'EUROCODICE come normativa di riferimento per i carichi mobili. Le due corsie convenzionali di 3.00 m di larghezza ciascuna e la zona rimanente di 2.75 m di larghezza sono state definite su MIDAS CIVIL come *Traffic Line Lanes*, indicando l'eccentricità del loro asse rispetto all'asse della trave (ved. Allegato A).



**Figura 4.4.13 : Traffic Line Lanes**

Si è proseguito definendo lo *Standard Vehicular Load*. Lo schema di carico utilizzato è stato il *Load Model 1*, corrispondente allo Schema di Carico 1.

Define Standard Vehicular Load

Standard Name: EN 1991-2:2003 - RoadBridge

Vehicular Load Properties

Vehicular Load Name: Load Model 1

Vehicular Load Type: Load Model 1

Location	Tandem System		UDL System	
	Adjustment Factor	Axle Loads (N)	Adjustment Factor	Uniformly Dist Loads (N/mm <sup>2</sup> )
Lane Number1	1	300000	1	0.009
Lane Number2	1	200000	1	0.0025
Lane Number3	1	100000	1	0.0025
Other Lanes & Remaining Area	0	0	1	0.0025

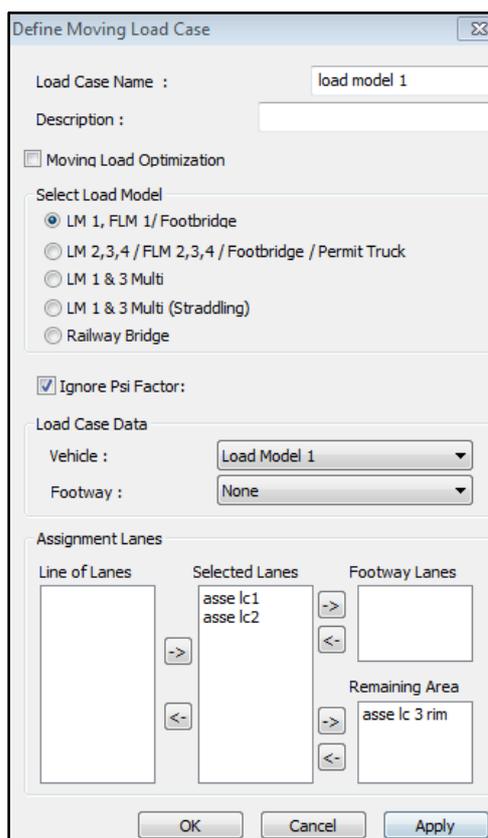
Psi factor for Tandem System: 0.75

Psi factor for UDL System: 0.4

OK Cancel Apply

**Figura 4.4.14 : Schema di Carico 1**

Indicati il carico veicolare mobile e le corsie, si è proceduto a definire il *Moving Load Case*, specificando le caratteristiche delle singole corsie. Le due corsie di larghezza 3.00 m ciascuna sono state inserite come corsie convenzionali; mentre la corsia di larghezza 2.75 m è stata inserita come area rimanente, in modo da massimizzare gli effetti flessionali nella sezione di mezzeria (più sfavorevole).



**Figura 4.4.15 : Moving Load Case**

Prima di definire il carico di precompressione, è stato creato il cavo di post-tensione interna. L'area del cavo costituito da 12 trefoli risultava pari a  $1664.4 \text{ mm}^2$ . Il diametro del cavo è stato assegnato pari a 75 mm. Il coefficiente di rilassamento del cavo è stato calcolato automaticamente dal software secondo la normativa europea. Il coefficiente d'attrito di curvatura del cavo è stato posto pari a 0.19. Infine è stato definito un rientro degli ancoraggi pari a 5 mm.

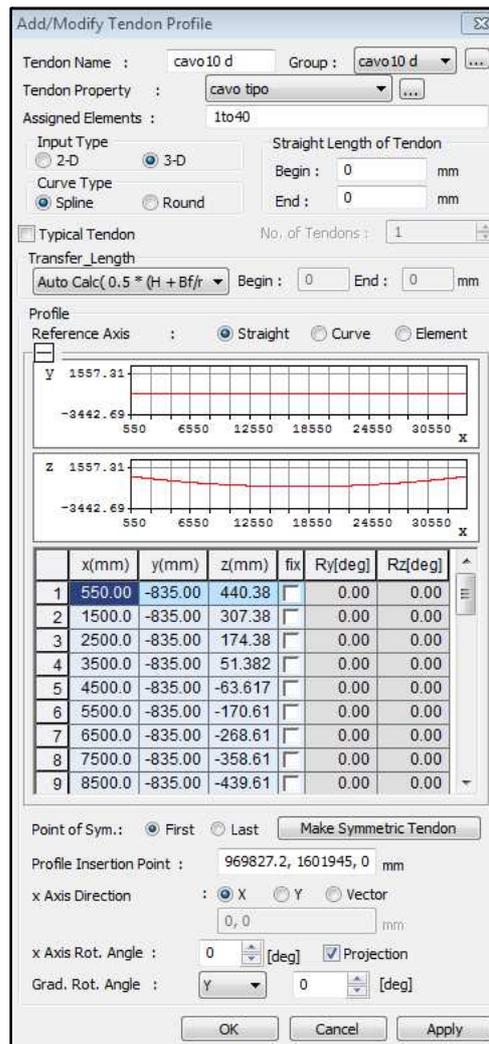
The image shows a software dialog box titled "Add/Modify Tendon Property". It contains the following fields and options:

- Tendon Name:** cavo tipo
- Tendon Type:** Internal(Post-Tension)
- Material:** 3: acciaio precomp
- Total Tendon Area:** 1664.4 mm<sup>2</sup>
- Duct Diameter:** 75 mm
- Relaxation Coefficient:**
- Name:** (empty)
- Ultimate Strength:** 1860 N/mm<sup>2</sup>
- Yield Strength:** 1600 N/mm<sup>2</sup>
- Curvature Friction Factor (μ):** 0.19
- Wobble Friction Factor (κ = μ x k):**  1.9e-006 1/mm
- Unintentional Angular Displacement (k):**  1e-005 rad/mm
- External Cable Moment Magnifier:** 0 N/mm<sup>2</sup>
- Anchorage Slip (Draw in):**
  - Begin: 5 mm
  - End: 0 mm
- Bond Type:**  Bonded,  Unbonded

Buttons: OK, Cancel, Apply

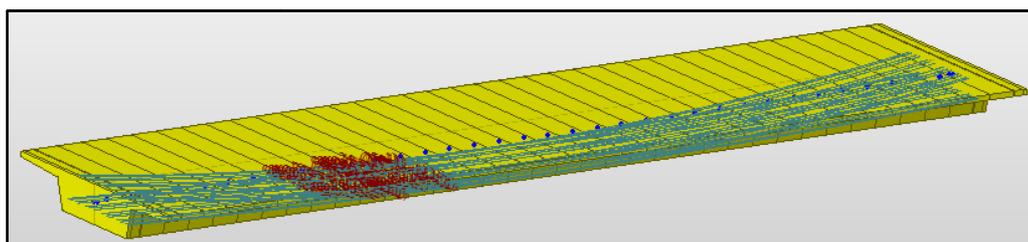
**Figura 4.4.16 : Tendon property**

E' stato poi possibile inserire il tracciato del cavo, *Tendon Profile*, inserendo nella *Tendon Property* il cavo precedentemente creato. Per ognuno dei 28 tracciati è stato creato in parallelo il proprio *Group*. Il singolo tracciato è stato inserito punto per punto, specificando la posizione del cavo in direzione x, y e z rispetto al baricentro della sezione trasversale di una delle estremità della trave. Per comodità i tracciati dei 28 cavi sono stati inizialmente definiti su Excel (ved. Allegato B) e successivamente riportati su MIDAS CIVIL. La lunghezza di trasferimento dello sforzo è stata calcolata automaticamente dal software.



**Figura 4.4.17 : Tendon Profile**

Poiché sussisteva la simmetria della posizione dei cavi rispetto all'asse della trave, si poteva trascurare l'eccentricità dei cavi in direzione y. Al posto di 28 cavi si sarebbero potuti modellare 2 cavi di post-tensione, ognuno di area pari alla somma delle aree di 14 cavi. Ai fini del dimensionamento del rinforzo, però, è stato necessario inserire nel modello i 28 cavi separatamente, per valutare gli effetti della rottura dei singoli cavi.



**Figura 4.4.18 : I 28 tracciati dei cavi di post-tensione**

Definiti i profili dei 28 cavi, è stato applicato il carico statico di precompressione, *Tendon Prestress Load*. Per la precompressione esercitata da ciascun cavo è stato creato un corrispondente caso di carico. I 28 *Load Cases* costituiscono le 28 azioni di precompressione che esercitano i 28 cavi. La precompressione è stata inserita come forza applicata dal cavo alla trave pari a 1751.4 kN. Visto che il cavo ha una estremità fissa e l'altra a tendere, tale forza è stata applicata solo da un estremo (ved. Allegato C), *Force Begin*. Alla fine della fase di precompressione la guaina è stata riempita con boiaccia cementizia.

Su MIDAS CIVIL è possibile definire le fasi di costruzione, *Construction Stages*, attivando i rispettivi elementi, vincoli e carichi agenti ad ogni fase. Nella condizione originaria di progetto sono state definite 4 fasi costruttive per la durata della vita utile dell'opera (70anni).

0gg FINE '80			25550gg 70 anni dopo
GETTO TRAVE	CAVI DI PRECOMPRESSIONE	CARICHI PERMANENTI PORTATI	EFFETTI REOLOGICI
28gg	7gg	28gg	25487gg

La fase di getto è stata iniziata al momento della costruzione dell'opera (0gg). Poiché il calcestruzzo inizia ad avere una resistenza iniziale dopo 28 giorni dal getto, la fase è stata posta di pari durata. In questa fase sono stati attivati l'elemento *trave*, i vincoli *cassero* ed *appoggi*, ed il carico permanente *Self Weight* della trave. Avendo il calcestruzzo acquisito una resistenza, è stato possibile definire la seconda fase di costruzione, la tesatura dei cavi di precompressione. In questa fase sono stati rimossi i vincoli *cassero* e lasciati solo i vincoli *appoggi*. La tesatura dei 28 cavi di precompressione è stata eseguita attivando i 28 carichi statici permanenti *Tendon Prestress Load*. Immediatamente dopo la tesatura dei cavi di post-tensione, si è proceduto all'applicazione dei carichi permanenti portati, pavimentazione, cordoli laterali e barriere di sicurezza, attivando i rispettivi carichi uniformemente distribuiti. Infine è stata definita l'ultima fase per l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo nel tempo. In questa fase non sono più stati attivati altri carichi ma è stato lasciato il tempo al calcestruzzo di reagire sotto i carichi permanenti strutturale e portati (ved. Allegato D).

#### *4.4.4 Modellazione della trave a cassone nella situazione attuale di danneggiamento*

Dalle indagini fatte in situ, e di cui si è detto in precedenza, è emerso che il viadotto attualmente si trova in stato di danneggiamento con la rottura di alcuni cavi di post-tensione. In particolare la campata 4 dell'impalcato sud ha subito la rottura del cavo 11d, denominazione data al momento della definizione dei tracciati dei 28 cavi di precompressione. Gli altri cavi presenti nella campata 4 hanno subito un forte degrado e un conseguente allentamento, rimanendo però in tensione. In base alle informazioni precedenti sulla situazione attuale della campata 4 si è deciso di modellare la trave da ponte in assenza di due cavi di precompressione. La scelta dei cavi assenti nel modello è stata pensata in modo tale da confrontare gli effetti causati dalla rottura di cavi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato, gli effetti causati dalla rottura di cavi asimmetrici posizionati su lati opposti dell'asse dell'impalcato e gli effetti causati dalla rottura di cavi posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato.

##### *4.4.4.1 Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato*

Prendendo come riferimento le informazioni ottenute dai saggi esplorativi, si è optato di eliminare dal modello precedentemente eseguito per la situazione originaria di progetto i due cavi di precompressione 11d e 11s, così denominati al momento della definizione dei 28 tracciati. Per simulare la rottura dei cavi 11d e 11s nel modello, si sono modificate le *Construction Stages* precedentemente definite per la situazione progettuale. Si è creata una fase intermedia di costruzione tra l'applicazione dei carichi permanenti portati e l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo. La fase di perdita di precompressione dei due cavi è stata finita 27 anni dopo dall'inizio della costruzione dell'opera, tempo coincidente con il momento in cui sono state individuate le fessure sul viadotto. All'opposto dell'applicazione dei carichi statici di precompressione al momento della tesatura, sono stati disattivati i carichi statici di

precompressione del cavo 11d e del cavo 11s nella fase di perdita di precompressione (ved. Allegato G).

La tabella seguente riporta le *Construction Stages* per la situazione di danneggiamento con la perdita dei due cavi di precompressione.

Ogg				25550gg
FINE '80				70 anni dopo
GETTO TRAVE	CAVI DI PRECOMPRESSIONE	CARICHI PERMANENTI PORTATI	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	EFFETTI REOLOGICI
28gg	7gg	28gg	9792gg	15695gg
				27 anni dopo
				9855gg

#### 4.4.4.2 *Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione asimmetrici rispetto all'asse dell'impalcato*

Prendendo come riferimento le informazioni ottenute dai saggi esplorativi, si è optato di eliminare dal modello precedentemente eseguito per la situazione originaria di progetto i due cavi di precompressione 11d e 3s, così denominati al momento della definizione dei 28 tracciati. Per simulare la rottura dei cavi 11d e 3s nel modello, si sono modificate le *Construction Stages* precedentemente definite per la situazione progettuale. Si è creata una fase intermedia di costruzione tra l'applicazione dei carichi permanenti portati e l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo. La fase di perdita di precompressione dei due cavi è stata finita 27 anni dopo l'inizio della costruzione dell'opera, tempo coincidente con il momento in cui sono state individuate le fessure sul viadotto. All'opposto dell'applicazione dei carichi statici di precompressione al momento della tesatura, sono stati disattivati i carichi statici di precompressione del cavo 11d e del cavo 3s nella fase di perdita di precompressione (ved. Allegato G).

La tabella seguente riporta le *Construction Stages* per la situazione di danneggiamento con la perdita dei due cavi di precompressione.

Ogg				25550gg
FINE '80				70 anni dopo
GETTO TRAVE	CAVI DI PRECOMPRESSIONE	CARICHI PERMANENTI PORTATI	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	EFFETTI REOLOGICI
28gg	7gg	28gg	9792gg	15695gg
				27 anni dopo
				9855gg

#### 4.4.4.3 Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato

Prendendo come riferimento le informazioni ottenute dai saggi esplorativi, si è optato di eliminare dal modello precedentemente eseguito per la situazione originaria di progetto i due cavi di precompressione 11d e 3d, così denominati al momento della definizione dei 28 tracciati. Per simulare la rottura dei cavi 11d e 3d nel modello, si sono modificate le *Construction Stages* precedentemente definite per la situazione progettuale. Si è creata una fase intermedia di costruzione tra l'applicazione dei carichi permanenti portati e l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo. La fase di perdita di precompressione dei due cavi è stata finita 27 anni dopo l'inizio della costruzione dell'opera, tempo coincidente con il momento in cui sono state individuate le fessure sul viadotto. All'opposto dell'applicazione dei carichi statici di precompressione al momento della tesatura, sono stati disattivati i carichi statici di precompressione del cavo 11d e del cavo 3d nella fase di perdita di precompressione (ved. Allegato G).

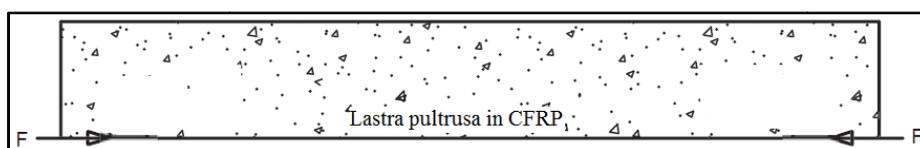
La tabella seguente riporta le *Construction Stages* per la situazione di danneggiamento con la perdita dei due cavi di precompressione.

Ogg		25550gg		
FINE '80		70 anni dopo		
GETTO TRAVE	CAVI DI PRECOMPRESSIONE	CARICHI PERMANENTI PORTATI	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	EFFETTI REOLOGICI
28gg	7gg	28gg	9792gg	15695gg
		27 anni dopo		
		9855gg		

## 4.5 SISTEMA DI RINFORZO

La soluzione adottata per il recupero della precompressione persa è apparsa la più indicata date le condizioni operative e logistiche del caso in esame. L'intervento di demolizione con ricostruzione o sostituzione della trave da ponte è stato escluso per ragioni di tempi, dovendosi limitare al minimo possibile il periodo di chiusura del viadotto, oltre che per ragioni di costi. L'impiego di precompressione esterna impressa con trefoli in acciaio armonico non aderenti è stato scartato per motivi di ingombro e di sicurezza mentre un semplice placcaggio passivo non avrebbe a sua

volta consentito il recupero della precompressione persa. Si è scelto allora di adoperare lo *StressHead-CarboStress post-tensioning system*, descritto nel Capitolo 3, consistente in una precompressione esterna impressa mediante lastre pultruse in fibra di carbonio, aderenti all'intradosso della trave da ponte e messe in tensione durante la fase di polimerizzazione dell'adesivo per mezzo di martinetti idraulici. Le lamine pultruse rese aderenti alla struttura vengono in tal modo a costituire per la struttura da rinforzare una armatura aggiuntiva non metallica che consente di aumentare il momento ultimo della sezione.



**Figura 4.5.1 : Precompressione impressa con lastre pultruse in CFRP**

#### 4.5.1 Dimensionamento del rinforzo

Dall'analisi strutturale eseguita sui modelli della trave nelle diverse configurazioni di rottura dei cavi di precompressione, si è visto, come meglio dettagliato nei capitoli seguenti, che qualsiasi sia la posizione trasversale dei due cavi rotti gli effetti dovuti alla perdita di precompressione sono quasi corrispondenti. Si è deciso, perciò, di dimensionare il rinforzo in assenza di due cavi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato, cavo 11d e 11s, così denominati al momento della definizione dei 28 tracciati dei cavi di post-tensione.

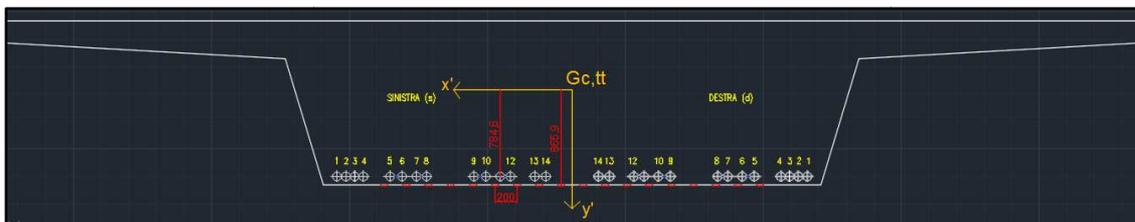
Per la valutazione del numero di lastre pultruse CFRP e dell'intensità dello sforzo da applicare si è seguito un criterio di equivalenza flessionale imponendo nella sezione di mezzeria l'eguaglianza tra il momento di precompressione indotto originariamente dallo sforzo presente nel cavo tranciato ed il momento di precompressione indotto dallo sforzo agente nelle lastre pultruse CFRP. Con riferimento al singolo cavo tranciato, avendo il cavo tranciato e le lastre bracci diversi rispetto al baricentro della sezione considerata tutta di calcestruzzo  $G_{c,tt}$ , l'equazione di equivalenza viene scritta nel seguente modo.

$$N_{cavo}b_{cavo} = N_{CFRP}b_{CFRP}$$

Lo sforzo presente all'interno del cavo  $N_{cavo}$  dipende dalla tensione in esercizio a lungo termine ammessa all'epoca. Il valore di  $N_{cavo}$  è ricavato dalla seguente espressione.

$$N_{cavo} = 1050 * A_{cavo} * 0.8$$

Il valore di  $N_{cavo}$  risulta pari a 1398.1 kN. I bracci del cavo e delle lastre pultruse CFRP valgono rispettivamente 784.6 mm e 865.9 mm. Infine il valore ottenuto di  $N_{CFRP}$  è pari a 1266.8 kN. Quest'ultimo è il valore dello sforzo tensionale agente nelle lastre pultruse CFRP a lungo termine. Per conoscere lo sforzo tensionale iniziale da applicare al momento della tesatura delle lastre pultruse, si suddivide il valore di  $N_{CFRP}$  per  $0.8*0.85$ , corrispondenti rispettivamente al fattore di conversione per effetti di lunga durata ed al fattore di conversione ambientale che caratterizzano i compositi CFRP, ottenendo uno sforzo tensionale iniziale agente nelle lastre pultruse CFRP pari a 1863 kN. Il sistema di rinforzo adottato per il recupero della precompressione del cavo tranciato, lo *StressHead-CarboStress post-tensioning system*, esercita per ogni lastra pultrusa CarboDur S626 uno sforzo massimo di precompressione pari a 220 kN. Tale limite superiore di precompressione dato dal sistema di rinforzo utilizzato tiene in conto che la tensione iniziale di trazione agente nelle lastre pultruse CFRP non deve essere vicina alla resistenza a trazione del composito, ricordando che alla tensionale iniziale di trazione si andrà ad aggiungere la tensione di trazione originata dai carichi variabili mobili. Si ricava il numero di lastre pultruse CarboDur S626 dividendo 1863 kN per 220 kN, ottenendo l'applicazione di 9 lastre pultruse per ogni cavo tranciato ed uno sforzo tensionale iniziale per ogni lastra pultrusa pari a 207 kN.



**Figura 4.5.2 : 9 lastre pultruse CarboDur S626 per ogni cavo tranciato. In totale 18 lastre applicate in mezzera**

Per un immediato confronto, si è voluto seguire anche il calcolo del numero di trefoli necessari a recuperare la precompressione persa, qualora si avesse voluto restaurare la trave mediante precompressione esterna tradizionale con l'utilizzo di trefoli non aderenti all'intradosso della trave. Il trefolo scelto è costituito da 7 fili e ha un diametro nominale pari a 15.2 mm, una sezione che misura 139 mm<sup>2</sup> ed una tensione caratteristica  $f_{ptk}$  di 1860 MPa. Analogamente a quanto precedentemente fatto per le lastre, si è seguito un criterio di equivalenza flessionale imponendo nella sezione di mezzeria l'eguaglianza tra il momento di precompressione indotto originariamente dallo sforzo presente nel cavo tranciato ed il momento di precompressione indotto dallo sforzo agente nei trefoli. In riferimento alle normative vigenti, il valore della tensione di precompressione applicata all'istante iniziale, dopo il rilascio dei martinetti di tesatura e il trasferimento al calcestruzzo, tenuto conto delle perdite iniziali, non deve superare  $0.75f_{ptk}$ . Infine per ogni cavo tranciato si ottiene l'applicazione di 13 trefoli ed uno sforzo tensionale iniziale per ogni trefolo pari a 120.9 kN.

Considerando la situazione attuale di danneggiamento della trave da ponte, si dispongono le 18 lastre all'intradosso della trave come mostra la seguente Figura in pianta.



**Figura 4.5.3 : Disposizione delle 18 lastre CFRP lungo l'intradosso della trave**

L'interasse delle lastre pultruse CFRP misura 200 mm. Le lastre più lunghe misurano 32 m. Le lastre più corte hanno una lunghezza di 30 m. La lunghezza degli ancoraggi meccanici di estremità è pari a 270 mm.

#### 4.5.2 Modellazione della trave a cassone nella situazione futura di restauro

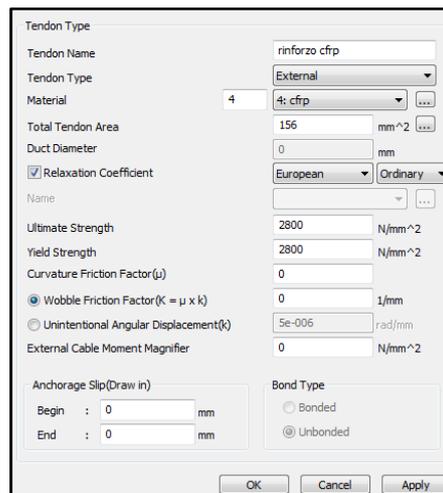
Riprendendo il modello della trave creato per la situazione attuale di danneggiamento con la rottura di due cavi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato, cavo 11d e 11s, è stato creato il materiale della lastra pultrusa CFRP, note le caratteristiche della lastra CarboDur S626.

General	
Material ID	4
Name	cfp
Elasticity Data	
Type of Design	User Defined
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic
User Defined	
Standard	None
DB	
Concrete	
Standard	
Code	
DB	
User Defined	
Modulus of Elasticity	1.6500e+005 N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.25
Thermal Coefficient	4.7170e-003 1/[F]
Weight Density	1.57e-005 N/mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density	0 N/mm <sup>3</sup> /g
Concrete	
<input type="checkbox"/> Modulus of Elasticity	0.0000e+000 N/mm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0
<input type="checkbox"/> Thermal Coefficient	0.0000e+000 1/[F]
<input type="checkbox"/> Weight Density	0 N/mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density	0 N/mm <sup>3</sup> /g
Plasticity Data	
Plastic Material Name	NONE
Thermal Transfer	
Specific Heat	0 Btu/N*[F]
Heat Conduction	0 Btu/mm <sup>2</sup> *hr*[F]
Damping Ratio	0

Figura 4.5.4 : Caratteristiche della lastra pultrusa CFRP

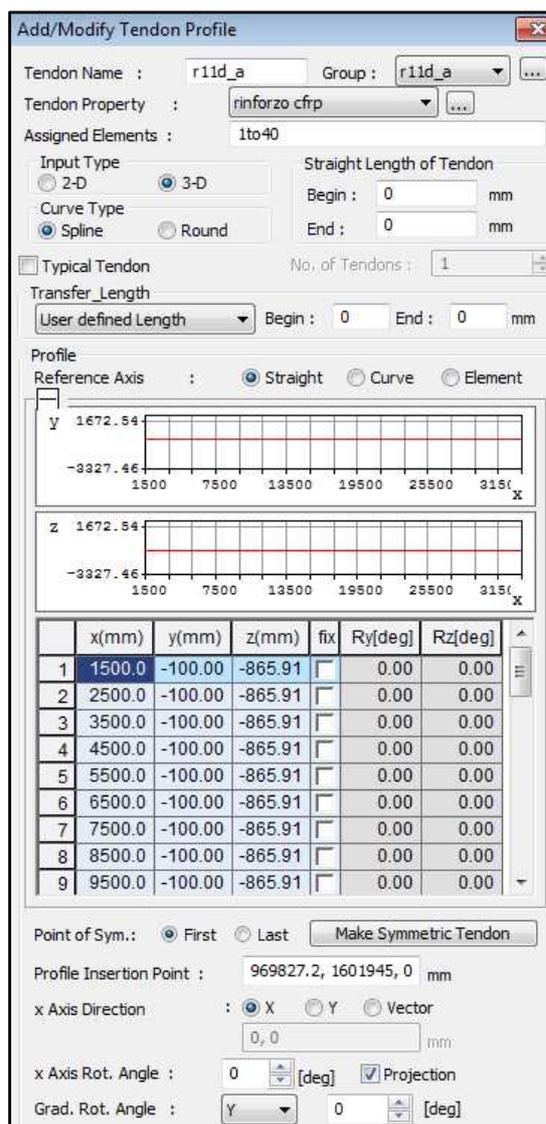
Definito il materiale, si è andata a definire la *Tendon Property*, proprietà del cavo di precompressione esterna. Note le caratteristiche della lastra CarboDur S626, l'area del cavo è stata posta pari a  $156 \text{ mm}^2$ . Il coefficiente di rilassamento del cavo è stato calcolato automaticamente dal software utilizzando la normativa europea e corrispondeva ad una perdita di tensione a tempo infinito del 20%. La resistenza a

rottura è stata posta pari a 2800 MPa, evidenziando un comportamento puramente elastico. Essendo le lastre pultruse CFRP placcate all'intradosso della trave da ponte, il coefficiente di curvatura che caratterizza il cavo di precompressione esterna è stato posto pari a zero. Infine il rientro degli ancoraggi è stato posto pari a zero dal momento che le estremità della lastra sono ancorate agli ancoraggi meccanici StressHead.



**Figura 4.5.5 : Proprietà del cavo di precompressione esterna**

Successivamente sono stati definiti i 18 profili delle lastre pultruse CFRP. Analogamente a quanto fatto per i cavi di precompressione interna, è stato definito il tracciato del cavo di precompressione esterna, *Tendon Profile*, inserendo nella *Tendon Property* il cavo precedentemente creato. Per ognuno dei 18 tracciati è stato creato in parallelo il proprio *Group*. Il singolo tracciato è stato inserito punto per punto, specificando la posizione del cavo di precompressione esterna in direzione x, y e z rispetto al baricentro della sezione trasversale di una delle estremità della trave. Per comodità i tracciati delle 18 lastre sono stati inizialmente definiti su Excel (ved. Allegato L) e successivamente riportati su MIDAS CIVIL.



**Figura 4.5.6 : Tendon Profile di un cavo di precompressione esterna**

Definiti i profili delle 18 lastre pultruse CFRP, è stato definito il carico statico di precompressione, *Tendon Prestress Load*. Per la precompressione esercitata da ciascuna lastra è stato creato un corrispondente caso di carico. I 18 *Load Cases* costituiscono le 18 azioni di precompressione che esercitano i 18 cavi di precompressione esterna. La precompressione è stata inserita come forza applicata dalla lastra alla trave pari a 207 kN. Visto che la lastra ha una estremità fissa e l'altra a tendere, tale forza è stata applicata solo da uno estremo, *Force Begin*, analogamente a quanto fatto per i cavi di precompressione interna (ved. Allegato M).

Avendo ripreso il modello della trave creato per la situazione attuale di danneggiamento con la rottura di due cavi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato,

cavo 11d e 11s, si sono modificate le *Construction Stages* definite per tale condizione. Si sono create due fasi intermedie di costruzione tra la fase di perdita di precompressione dei due cavi, finita 27 anni dopo l'inizio della costruzione dell'opera, tempo coincidente con il momento in cui sono state individuate le fessure sul viadotto, e l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo a tempo infinito. La prima fase intermedia è stata iniziata al momento dell'individuazione delle fessure (2014) ed è stata finita al momento dell'intervento di rinforzo. La prima fase intermedia è stata creata per l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo al momento dell'applicazione del sistema di rinforzo. La seconda fase intermedia creata è stata la fase di precompressione esterna impressa dalle lastre pultruse CFRP con una durata di 14gg. Nella fase di precompressione esterna sono stati applicati i carichi statici di precompressione esterna delle 18 lastre pultruse CFRP, analogamente a quanto fatto per la fase di precompressione interna.

La tabella seguente riporta le *Construction Stages* per la situazione futura di restauro.

Ogg		25550gg				
FINE '80		70 anni dopo				
GETTO TRAVE	CAVI DI PRECOMPRESSIONE	CARICHI PERMANENTI PORTATI	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	2014-2017	PRECOMPRESSIONE ESTERNA	EFFETTI REOLOGICI
28gg	7gg	28gg	9792gg	1095gg	14gg	14586

27 anni dopo

### VERIFICHE STRUTTURALI

Per i tre modelli agli elementi finiti del cassone (trave con 28 cavi integri, trave con 26 cavi e trave rinforzata), realizzati su MIDAS CIVIL, vengono riportati gli output dell'analisi strutturale per ogni combinazione delle azioni definita.

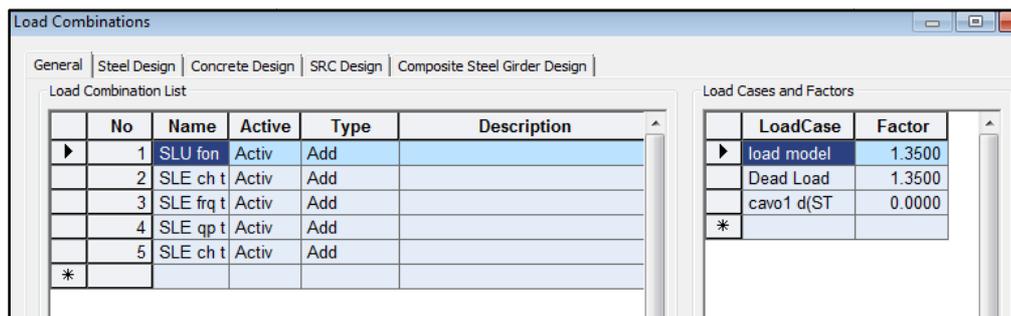
#### 5.1 Output dell'analisi strutturale del modello della trave con i 28 cavi integri

Sono stati riportati gli output delle combinazioni delle azioni allo SLU e allo SLE nella situazione originaria di progetto. Sono state eseguite le verifiche resistenti allo SLU e le verifiche tensionali allo SLE della sezione di mezzeria.

##### 5.1.1 Verifiche allo SLU

La sezione di mezzeria allo SLU viene vista come una sezione semplicemente inflessa. L'effetto isostatico della precompressione, dovuto alla sua eccentricità dal baricentro della trave, viene già preso in conto quando durante il calcolo del momento resistente la forza di precompressione viene applicata a livello dei cavi di post-tensione; la forza assiale di precompressione, inoltre, viene già presa in conto nella configurazione deformata allo SLU della sezione, imprimendo a livello dei cavi di precompressione una deformazione iniziale  $\epsilon_{p0}$  pari a  $\sigma_{p0}/E_p$ , dove  $\sigma_{p0}$  è la tensione iniziale del cavo e  $E_p$  è il modulo elastico del cavo. Dunque si verificherà che il momento sollecitante  $M_{Ed}$  sia minore o uguale al momento resistente  $M_{Rd}$ .

Il momento sollecitante  $M_{Ed}$  viene estratto dall'analisi strutturale del modello della trave con i 28 cavi nella combinazione SLU fondamentale. La precompressione in tale combinazione non è stata considerata, dal momento che la trave è semplicemente appoggiata ed isostatica. Infatti l'effetto iperstatico della precompressione non sussiste su una struttura isostatica.



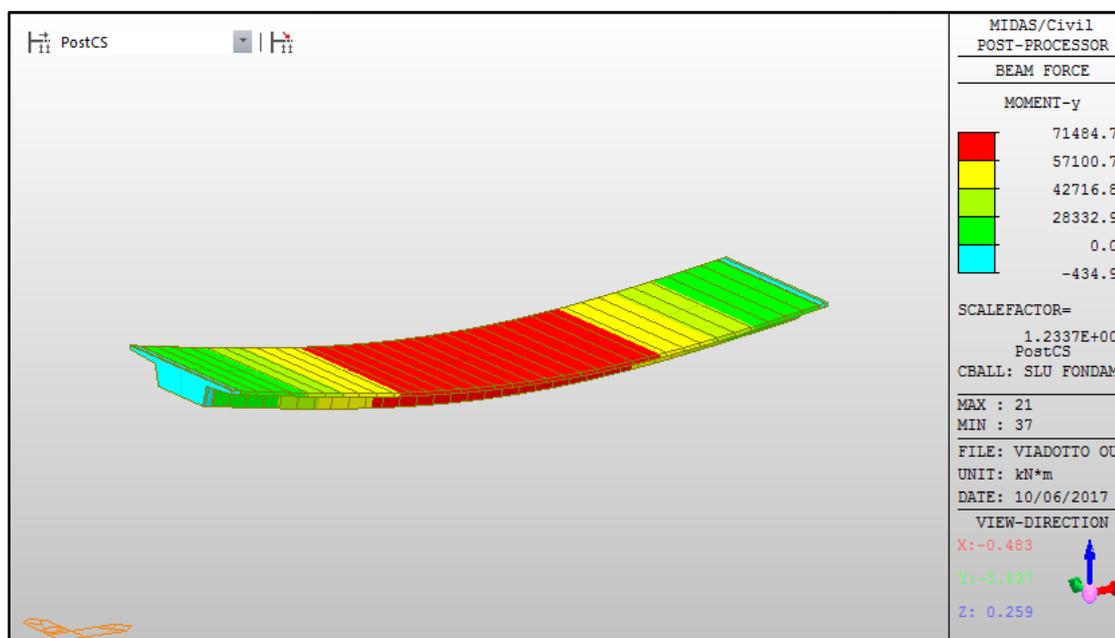
No	Name	Active	Type	Description
1	SLU fon	Activ	Add	
2	SLE ch t	Activ	Add	
3	SLE frq t	Activ	Add	
4	SLE qp t	Activ	Add	
5	SLE ch t	Activ	Add	
*				

LoadCase	Factor
load model	1.3500
Dead Load	1.3500
cavo1 d(ST)	0.0000
*	

**Figura 5.1.1 : Combinazione delle azioni allo SLU fondamentale**

Il momento sollecitante  $M_{Ed}$  nella sezione di mezzeria dall'analisi strutturale è risultato pari a 71484.73 kNm.



**Figura 5.1.2 : Momenti sollecitanti nelle sezioni della trave nella combinazione allo SLU fondamentale**

Successivamente si è calcolato il momento resistente  $M_{Rd}$ . Per il calcolo del momento resistente della sezione si è utilizzato il software VcaSlu del Prof. Piero Gelfi dell'Università di Brescia. Nel calcolo del momento resistente della sezione di mezzeria vengono tenute in conto oltre ai cavi di precompressione anche le armature lente presenti nella sezione. Infatti si tratta di una precompressione parziale.

Inizialmente su VcaSlu sono stati inseriti gli 8 vertici della sezione del cassone in senso antiorario, avendo scelto arbitrariamente come origine degli assi x ed y il punto medio della base inferiore della sezione. In seguito sono state inserite le armature

lente, indicando la loro posizione e la loro area. Considerato che il momento resistente calcolato è quello intorno all'asse x, si è trascurata l'eccentricità delle armature lente in direzione x e si è inserita un'unica armatura di area pari alla somma delle aree delle armature lente presenti per ciascun livello in direzione y. Analogamente è stato fatto per i cavi di precompressione che nella sezione di mezzeria si trovano tutti allo stesso livello, a 8 cm dall'intradosso della trave. Quando sono state inserite le armature lente si è tenuto conto del copriferro pari a 5 cm e del diametro delle armature trasversali pari a 1.6 cm. Infine sono stati definiti i materiali. Il calcestruzzo è stato posto di classe C30/37 a favore di sicurezza. Alle armature lente è stato assegnato un acciaio tipo FeB44k. Per i cavi di precompressione, essendo costituiti da 12 trefoli, le caratteristiche del materiale assegnate sono state quelle del trefolo.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays the following data:

**Titolo:** cassone

**N° Vertici:** 8 **Zoom** **N° barre:** 17 **Zoom**

N°	x [cm]	y [cm]	N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	225	0	1	38.2	0	7.4
2	260	115	2	4.02	0	30.4
3	517.5	130	3	4.02	0	53.4
4	517.5	150	4	4.02	0	76.4
5	-517.5	150	5	4.02	0	99.4
6	-517.5	130	6	4.02	0	122.4

**Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n

**N<sub>Ed</sub>:** 0 **0** kN

**M<sub>xEd</sub>:** 71484.73 **0** kNm

**M<sub>yEd</sub>:** 0 **0**

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls

**Coord.[cm]:** xN 0 yN 0

**Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Cavo snervato

**M<sub>Rd</sub>:** 83 077 kNm

**σ<sub>c</sub>:** -17 N/mm<sup>2</sup>

**σ<sub>s</sub>:** 373.9 N/mm<sup>2</sup>

**ε<sub>c</sub>:** 3.5 ‰

**ε<sub>s</sub>:** 5.731 ‰

**d:** 142.6 cm

**x:** 54.07 **x/d:** 0.3791

**δ:** 0.9139

**Materiali:** FeB44k C30/37

**ε<sub>su</sub>:** 67.5 ‰ **ε<sub>c2</sub>:** 2 ‰

**f<sub>yd</sub>:** 373.9 N/mm<sup>2</sup> **ε<sub>cu</sub>:** 3.5 ‰

**E<sub>s</sub>:** 200 000 N/mm<sup>2</sup> **f<sub>cd</sub>:** 17

**E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>:** 15 **f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>:** 0.8

**ε<sub>syd</sub>:** 1.87 ‰ **σ<sub>c,adm</sub>:** 11.5

**σ<sub>s,adm</sub>:** 255 N/mm<sup>2</sup> **τ<sub>co</sub>:** 0.6933

**τ<sub>c1</sub>:** 2.029

**Tipo Sezione:** Rettan.re Trapezi a T Circolare Rettangoli Coord.

**Armatura Precompressione:** N° cavi 1 Zoom

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]	σ <sub>sp</sub> [MPa]
1	466.032	0	8	1050

**Tipo cavo:** Trefolo

**ε<sub>su</sub>:** 67.5 ‰

**f<sub>yd</sub>:** 1 409 N/mm<sup>2</sup>

**E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>:** 6

**ε<sub>syd</sub>:** 7.045 ‰

**σ<sub>s,adm</sub>:** 1080 N/mm<sup>2</sup>

**σ<sub>sp</sub>:** 1 409 N/mm<sup>2</sup>

**ε<sub>sp</sub>:** 10.94 ‰ compressa pref.

**Metodo di calcolo:** S.L.U. + S.L.U. Metodo n

**Tipo flessione:** Retta Deviata

**N° rett.:** 100

**Calcola MRd** **Dominio M-N**

**L<sub>0</sub>:** 0 cm **Col. modello**

Precompresso

**Figura 5.1.3 : Momento resistente nella sezione di mezzeria nella combinazione allo SLU fondamentale**

Il momento resistente della sezione di mezzeria  $M_{Rd}$  è risultato pari a 83077 kNm. Dal momento che  $M_{Ed}$  risulta minore di  $M_{Rd}$ , la verifica allo SLU è soddisfatta. Il coefficiente di sicurezza CS pari a  $M_{Rd}/M_{Ed}$  è risultato 1.16 con un margine di sicurezza del 16%.

### 5.1.2 Verifiche allo SLE

Le verifiche tensionali allo SLE sono state effettuate al tempo infinito (70anni), già scontati gli effetti reologici di fluage e ritiro del calcestruzzo. Le combinazioni delle azioni allo SLE analizzate sono state la combinazione rara (o caratteristica) e la combinazione quasi permanente.

In accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni nella combinazione rara la verifica diventa soddisfatta quando:

- $\sigma_c \leq 0.60f_{ck}$ ;
- $\sigma_p \leq 0.80f_{pyk}$  attualmente;
- $\sigma_p \leq 0.60f_{ptk}$  all'epoca di costruzione dell'opera;

dove  $\sigma_c$  è la tensione massima di compressione del calcestruzzo,  $\sigma_p$  è la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione,  $f_{ck}$  è la resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo ed è pari a 33.3 MPa,  $f_{ptk}$  è la resistenza a trazione del trefolo all'interno del cavo di precompressione ed  $f_{pyk}$  è convenzionalmente pari a  $0.9f_{ptk}$ . Dalle prove di trazione sui trefoli è stato rinvenuto un valore di  $f_{ptk}$  pari a 1800 MPa.

Nella combinazione quasi permanente, di contro, la verifica viene eseguita solo per la tensione presente nel calcestruzzo e risulta soddisfatta quando  $\sigma_c \leq 0.45f_{ck}$ .

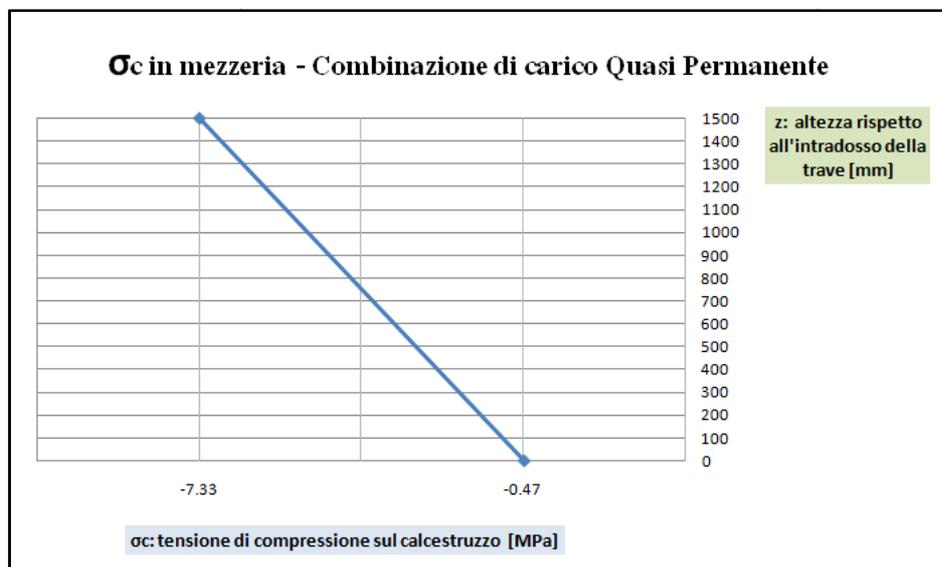
Inoltre viene verificata la tensione massima di trazione del calcestruzzo  $\sigma_t$ . Trattandosi di una precompressione parziale,  $\sigma_t$  deve risultare minore o uguale di  $f_{ct}$  (o  $f_{ctm}$ ) nella combinazione quasi permanente; mentre è ammessa la fessurazione nella combinazione rara. Il valore di  $f_{ct}$ , resistenza a trazione del calcestruzzo, deriva da  $f_{ck}$  ed è valutato con la seguente espressione.

$$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{2/3}$$

Il valore di  $f_{ct}$ , dunque, risulta pari a 3.1 MPa.

### 5.1.2.1 Verifiche tensionali allo SLE nella combinazione Quasi Permanente

Dall'analisi strutturale del modello della trave in presenza dei 28 cavi di precompressione è stato possibile estrarre i valori di  $\sigma_c$  per la sezione di mezzzeria nella combinazione quasi permanente. In realtà il programma restituisce le tensioni sul calcestruzzo in ogni sezione della trave (ved. Allegato E). Per maggiore facilità di confronto con i limiti stabiliti dalle normative i valori sono stati diagrammati su Excel.

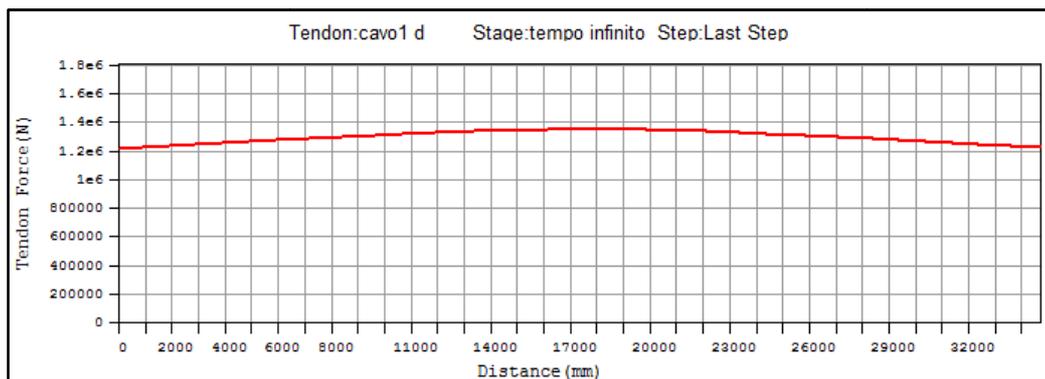


**Grafico 5.1.1 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzzeria nella combinazione Quasi Permanente**

La verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di trazione ammessa  $f_{ct}$  risulta soddisfatta, dal momento che tutta la sezione si trova in stato di compressione. Anche la verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di compressione ammessa  $0.45f_{ck}$  pari a 14.985 MPa risulta soddisfatta, dal momento che  $\sigma_c$  pari a 7.33 MPa risulta minore di quest'ultima.

Con l'utilizzo di MIDAS CIVIL è possibile conoscere nella combinazione Quasi Permanente la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione  $\sigma_p$ . Il cavo di precompressione scelto come riferimento per la sezione di mezzzeria è il cavo 1d,

così denominato al momento della definizione dei tracciati dei 28 cavi. La scelta del cavo di riferimento è stata influenzata dal fatto che quest'ultimo dopo la fase di tesatura presentava uno sforzo di trazione maggiore rispetto agli altri cavi. Grazie anche alla sua posizione all'estremità della sezione di mezzeria, esso è stato ritenuto un buon punto di rilievo. Inoltre dai saggi esplorativi esso non aveva subito danneggiamenti e quindi il valore ricavato dal modello per quel cavo è stato considerato più vicino alla situazione in situ.



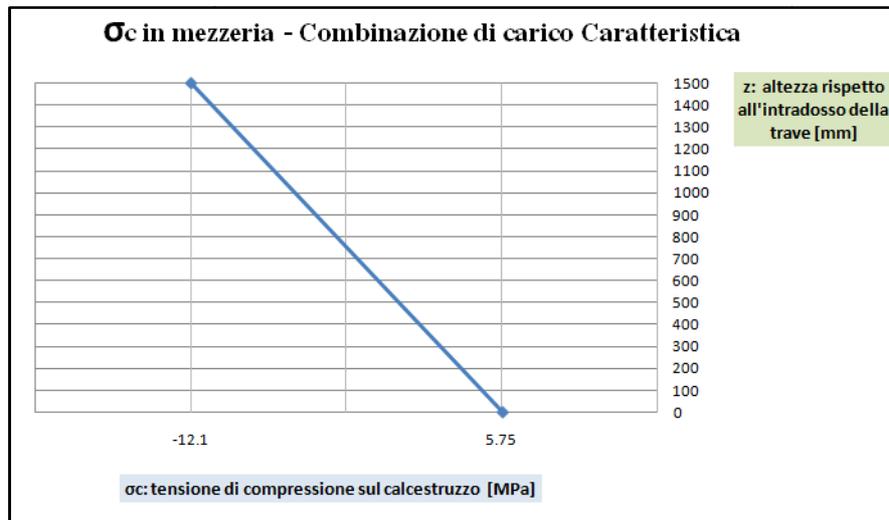
**Figura 5.1.4 : Sforzo di trazione presente lungo il cavo 1d nella combinazione allo SLE Quasi Permanente**

Lo sforzo massimo di trazione all'interno del cavo 1d in corrispondenza della sezione di mezzeria è pari a  $1.35e+6$  N. La  $\sigma_p$ , dunque, è pari a  $F/A_{cavo}$ , con un valore di 810.48 MPa. E' possibile notare come la precompressione impressa inizialmente da ciascun cavo pari a 1050 MPa è diminuita, a causa del rientro degli ancoraggi di testata, del rilassamento subito dall'acciaio nel tempo e degli effetti reologici del calcestruzzo sotto carico (fluage e ritiro) che non contrasta con la stessa intensità iniziale l'azione del cavo in tensione che tende a tornare al suo stato iniziale antecedente la sua tesatura.

#### 5.1.2.2 Verifiche tensionali allo SLE nella combinazione Caratteristica

Dall'analisi strutturale del modello della trave in presenza dei 28 cavi di precompressione è stato possibile estrarre i valori di  $\sigma_c$  per la sezione di mezzeria nella combinazione rara. In realtà il programma restituisce le tensioni sul calcestruzzo in ogni sezione della trave (ved. Allegato F). Per maggiore facilità di

confronto con i limiti stabiliti dalle normative i valori sono stati diagrammati su Excel.



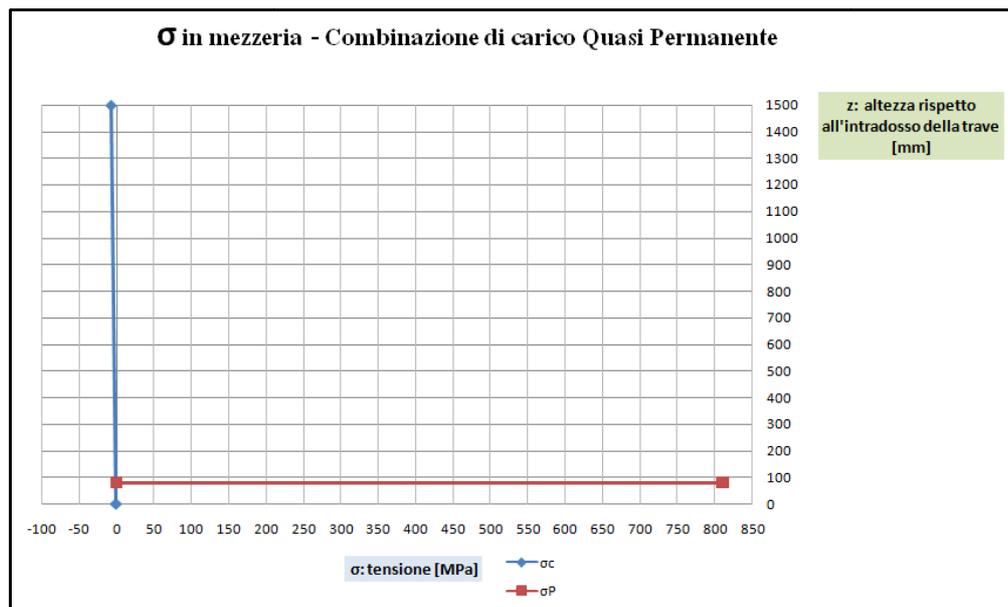
**Grafico 5.1.2 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione Caratteristica**

E' facile notare come nella combinazione caratteristica, l'azione dei carichi variabili mobili, agenti pienamente, aumenta la tensione all'intradosso della trave causando la fessurazione del calcestruzzo. Infatti la tensione massima di trazione presente nel calcestruzzo  $\sigma_t$  è pari a 5.75 MPa e supera la resistenza a trazione  $f_{ct}$  pari a 3.1 MPa. Essendo la sezione fessurata e quindi non interamente reagente, il Principio di Sovrapposizione degli Effetti valido nelle Scienze delle Costruzioni, ed utilizzabile per la sezione interamente compressa, viene meno per il calcolo delle tensioni sulla sezione di mezzeria parzializzata. I valori di output delle  $\sigma_c$  estratte dal software non sono quindi attendibili. Di conseguenza per il calcolo delle tensioni  $\sigma_c$  e  $\sigma_p$  da verificare si è utilizzato il Metodo Alternativo, descritto nell'EUROCODICE 2 per una sezione in C.A.P. parzializzata.

*Metodo Alternativo:* Quando al tempo infinito alla combinazione delle azioni Quasi Permanente vengono aggiunti i carichi variabili mobili, la trave è soggetta alla combinazione delle azioni Caratteristica o rara. Dunque prima che i carichi variabili agiscano, gli effetti reologici dipendenti dal tempo sono già avvenuti. E' la variazione di momento, provocata dall'intervento dei carichi variabili, che provoca la fessurazione per trazione del calcestruzzo all'intradosso della trave. Tale variazione

di momento  $\Delta M$  risulta pari a 14076.59 kNm, valore ottenuto dalla differenza tra il momento sollecitante nella sezione di mezzeria nella combinazione Caratteristica ed il momento sollecitante nella sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente.

Il Metodo Alternativo prevede di partire dallo stato tensionale della sezione nella combinazione Quasi permanente. E' stato così diagrammato su Excel lo stato tensionale della sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente.

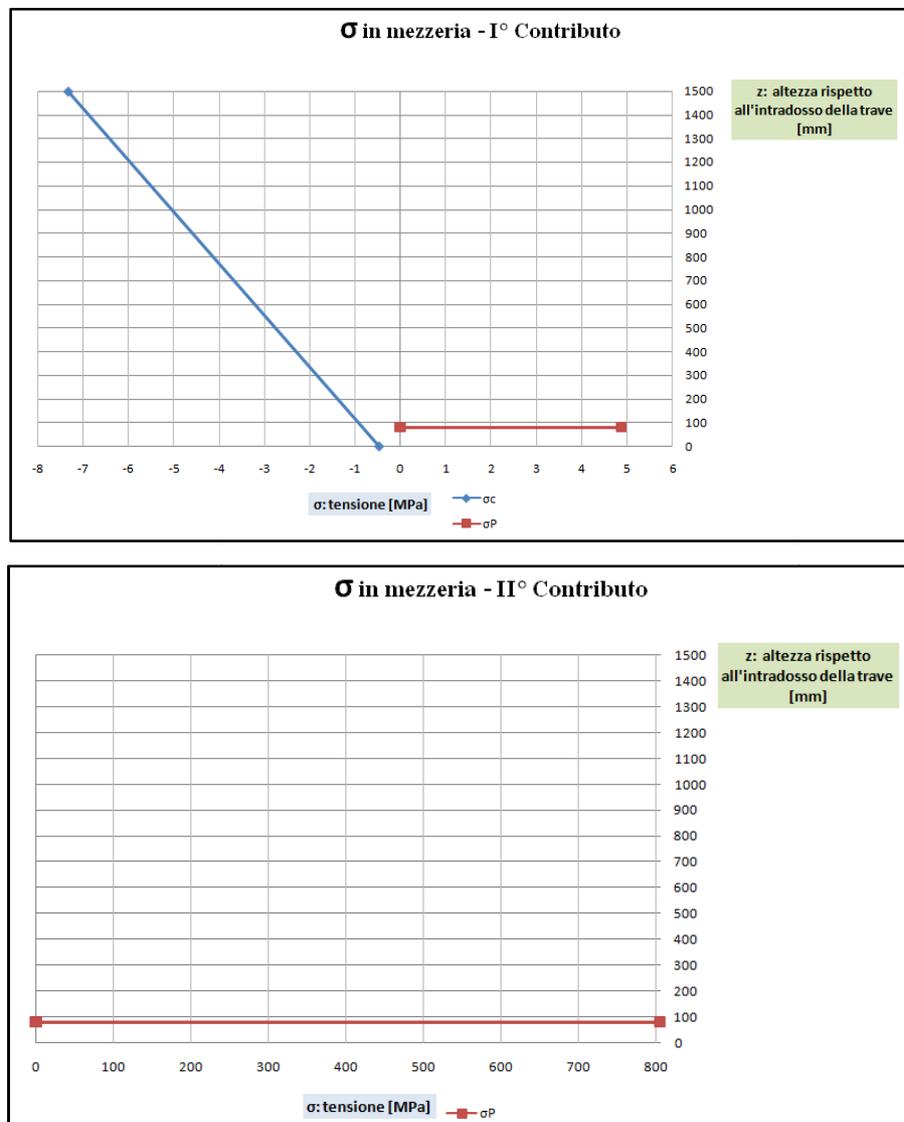


**Grafico 5.1.3 : Tensioni nella sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente**

Come è già noto le tensioni sul calcestruzzo nella combinazione Quasi Permanente sono  $\sigma_{c,sup}$  pari a 7.33 MPa e  $\sigma_{c,inf}$  pari a 0.47 MPa. Inoltre si ricorda che la tensione di trazione sul cavo di precompressione  $\sigma_p$  nella combinazione Quasi Permanente è pari a 810.48 MPa.

Il Metodo Alternativo prevede successivamente un artificio matematico. Lo stato di sollecitazione della sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente viene scomposto in due contributi che sommandosi riconducono lo stato di sollecitazione originario. Il primo contributo riporta le tensioni presenti sul calcestruzzo nella combinazione Quasi Permanente ed una tensione di trazione sul cavo di precompressione pari a  $\alpha_E \sigma_{cp}$ , dove  $\alpha_E$  è il coefficiente di omogeneizzazione dell'acciaio di precompressione pari a  $E_p/E_c$  e  $\sigma_{cp}$  è la tensione presente sul

calcestruzzo nella combinazione Quasi Permanente a livello dei cavi di precompressione.  $E_p$  è il modulo elastico del trefolo pari a 195000 MPa ed  $E_c$  è il modulo elastico del calcestruzzo pari a 33345 MPa. Il valore di  $\alpha_E$  risulta pari a 5.8 e di  $\sigma_{cp}$  risulta pari a 0.84 MPa. Dunque nel primo contributo la tensione di trazione a cui sono sottoposti i cavi di precompressione è uguale a 4.87 MPa. Il secondo contributo, invece, riporta solo una tensione di trazione del cavo di precompressione pari alla tensione di trazione presente nel cavo di precompressione nella combinazione Quasi Permanente  $\sigma_p$  meno la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione nel primo contributo  $\alpha_E \sigma_{cp}$ . La tensione di trazione presente nei cavi di precompressione nel secondo contributo è 805.61 MPa.



**Grafico 5.1.4 : Tensioni nella sezione di mezzeria nel primo e nel secondo contributo**

Ora, dunque, è possibile vedere come il primo contributo mi restituisca tensioni caratterizzanti una sezione presso inflessa interamente reagente. Perciò il Metodo Alternativo prevede la determinazione delle caratteristiche delle sollecitazioni  $N1^*$  e  $M1^*$  che generano lo stato tensione presente nel primo contributo. Il loro valore viene ricavato mediante l'utilizzo delle formule di Scienza delle Costruzioni per il calcolo delle tensioni in una sezione interamente reagente.

$$\sigma_{c,sup} = \frac{N1^*}{A_{c,om}} + \frac{M1^*}{I_{c,om,x}} * y_{sup}$$

$$\sigma_{c,inf} = \frac{N1^*}{A_{c,om}} + \frac{M1^*}{I_{c,om,x}} * y_{inf}$$

Note  $\sigma_{c,sup}$  e  $\sigma_{c,inf}$  nel primo contributo, diviene immediato determinare il baricentro della sezione omogeneizzata interamente reagente  $G_{c,om}$ . Essendo la sezione di mezzeria simmetrica il baricentro si trova sull'asse di simmetria. Basta, dunque, calcolare la posizione del baricentro rispetto all'intradosso della trave  $h_{G_{c,om}}$ . Quest'ultima altezza è data dal rapporto tra il momento statico della sezione omogeneizzata interamente reagente rispetto all'intradosso della trave  $S_{c,om,intradosso}$  e l'area della sezione omogeneizzata interamente reagente  $A_{c,om}$ . Il calcolo di  $S_{c,om,intradosso}$  e  $A_{c,om}$  è effettuato utilizzando le seguenti formule.

$$A_{c,om} = A_c + \alpha_E A_P = (A_{c,tt} - A_P) + \alpha_E A_P$$

$$S_{c,om,intradosso} = A_{c,tt} h_{G_{c,tt}} + (\alpha_E - 1) A_P h_P$$

Dove:

- $A_c$  è l'area di solo calcestruzzo della sezione;
- $A_{c,tt}$  è l'area della sezione come se fosse tutta di calcestruzzo;
- $h_{G_{c,tt}}$  è la distanza del baricentro della sezione come se fosse tutta di calcestruzzo rispetto all'intradosso della trave;
- $A_P$  è l'area totale dei 28 cavi di precompressione;
- $h_P$  è la distanza dei 28 cavi di precompressione rispetto all'intradosso della trave.

$A_{c,tt}$  e  $h_{G_{c,tt}}$  sono estratte per comodità dal software, avendo precedentemente definito la sezione trasversale della trave. I loro valori sono rispettivamente  $8717000 \text{ mm}^2$  e

864.6 mm.  $A_p$  viene calcolato moltiplicando l'area del singolo cavo per 28 e risulta pari a 46603.2 mm<sup>2</sup>.  $h_p$ , infine, è pari a 80 mm. Così  $h_{G_c,om}$  è noto ed è uguale a 848.8 mm. E' possibile notare come il baricentro della sezione omogeneizzata interamente reagente si trovi più in basso del baricentro della sezione considerata tutta di calcestruzzo. Infatti i cavi di precompressione che occupano lo spazio del calcestruzzo tolto alla sezione, essendo più pesanti del calcestruzzo, spostano il baricentro più in basso. Nota la posizione del baricentro della sezione omogeneizzata interamente reagente, si procede al calcolo del momento di inerzia  $I_{c,om,x}$  della sezione omogeneizzata interamente reagente rispetto all'asse orizzontale passante per  $G_{c,om}$ . Seguendo la convenzione di Scienza delle Costruzioni gli assi x e y sul piano della sezione trasversale hanno il loro punto di origine nel baricentro della sezione omogeneizzata interamente reagente  $G_{c,om}$ . Perciò  $y_{sup}$  e  $y_{inf}$  valgono rispettivamente -651.2 mm e +848.8 mm. Per il calcolo di  $I_{c,om,x}$  diventa di gran utilità scomporre la sezione in geometrie elementari come rettangoli e triangoli. Per il calcolo del momento d'inerzia delle geometrie elementari rispetto all'asse orizzontale x viene sfruttato il teorema di Huygens-Steiner, o teorema degli assi paralleli, che permette di calcolare il momento di inerzia di un solido rispetto ad un asse parallelo a quello passante per il centro di massa. La formulazione generica del teorema di Huygens-Steiner è la seguente.

$$I_x^e = I_{x_{G_e}}^e + A_e (y_{G_e})^2$$

Dove:

- $I_x^e$  è il momento di inerzia della i-esima geometria elementare rispetto all'asse orizzontale x passante per  $G_{c,om}$ ;
- $I_{x_{G_e}}^e$  è il momento di inerzia della i-esima geometria elementare rispetto all'asse orizzontale  $x_{G_e}$  passante per il proprio baricentro  $G_e$ ;
- $A_e$  è l'area dell'i-esima geometria elementare;
- $y_{G_e}$  è la distanza in direzione y dell'asse orizzontale  $x_{G_e}$  dell'i-esima geometria elementare dall'asse orizzontale x passante per  $G_{c,om}$ .

Il vantaggio di aver scomposto la sezione trasversale in geometrie elementari è dovuto al fatto di conoscere a priori  $I_{x_{G_e}}^e$  di geometrie elementari grazie alla Scienza delle Costruzioni e alla semplicità di calcolo di  $I_x^e$  di geometrie elementari.

Sezione	Area della sezione	Distanza dal baricentro	Momento di inerzia	Modulo di resistenza
	A cm <sup>2</sup>	a cm	J cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>
	BH - bh	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$
	BH - bh	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$
	BH - bh	$A = H - a$ $a = \frac{1}{2} \cdot \frac{cH^2 + bd^2}{cH + bd}$	$\frac{Ba^3 - b(h - A)^3 + cA^3}{3}$	$W_A = \frac{I}{A}$ $W_a = \frac{I}{a}$
	BH - bh	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$
	$\frac{B \cdot H}{2}$	$A = \frac{2H}{3}$ $a = \frac{H}{3}$	$\frac{B \cdot H^3}{36}$	$W_A = \frac{B \cdot H^2}{24}$ $W_a = \frac{B \cdot H^2}{12}$
	H <sup>2</sup>	$\frac{H}{2} \cdot \sqrt{2}$	$\frac{H^4}{12}$	$\frac{H^3}{6\sqrt{2}}$
	H <sup>2</sup> - h <sup>2</sup>	$\frac{H}{2} \cdot \sqrt{2}$	$\frac{H^4 - h^4}{12}$	$\frac{H^4 - h^4}{6H\sqrt{2}}$

$I = \text{raggio di inerzia} = \sqrt{\frac{\text{Momento di inerzia}}{\text{Area della sezione}}} = \sqrt{\frac{J}{A}}$

**Figura 5.1.5 : Momenti di inerzia di geometrie elementari rispetto all'asse orizzontale  $x_{G_e}$  passante per il proprio baricentro  $G_e$**



**Figura 5.1.6 : Scomposizione della sezione in geometrie elementari**

Ora è possibile calcolare  $I_{c,om,x}$  con la seguente espressione.

$$I_{c,om,x} = I_x^7 - 2I_x^1 - 2I_x^2 - 2I_x^3 + I_x^8 + 2I_x^9 + (\alpha_E - 1)A_P y_P^2$$

$y_p$  è la distanza in direzione  $y$  dei cavi di precompressione dall'asse orizzontale  $x$  passante per  $G_{c,om}$ . Di seguito si riportano i valori ottenuti dal calcolo dei momenti d'inerzia delle geometrie elementari rispetto all'asse orizzontale  $x$  passante per  $G_{c,om}$ .

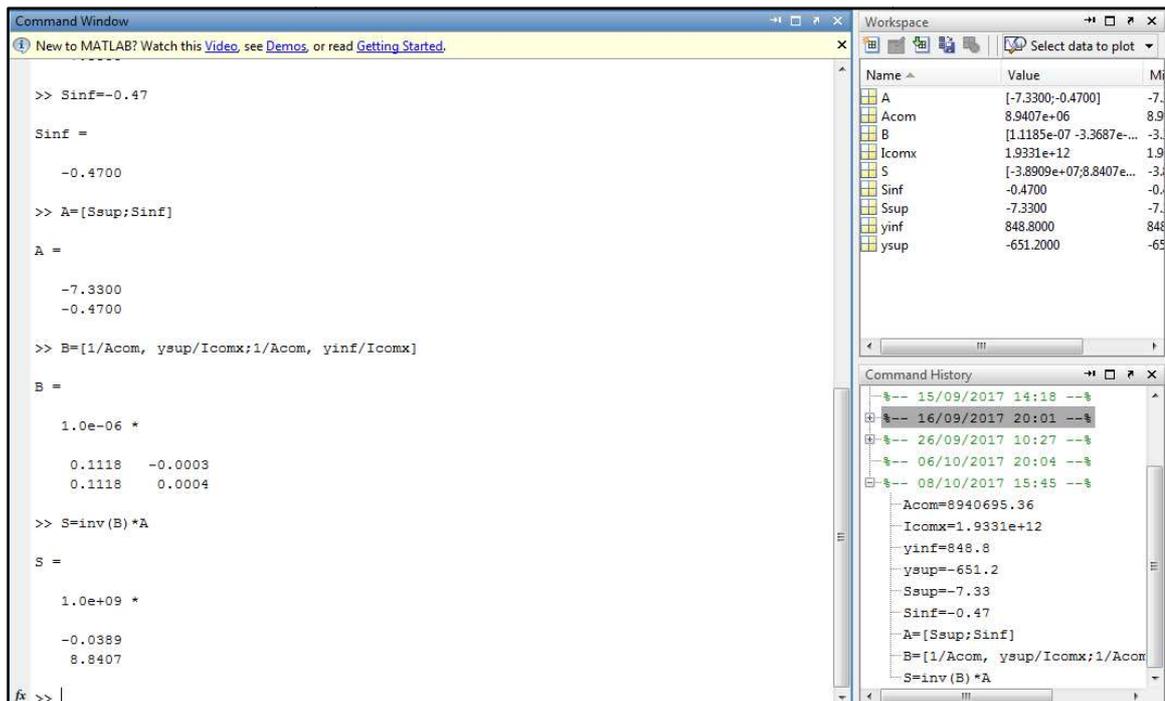
Geometria Elementare	$I_x$ [mm <sup>4</sup> ]
1	24061721850
2	23454213883
3	208741513.5
4	24061721850
5	23454213883
6	208741513.5
7	9.52713E+11
8	9.17292E+11
9	13164661922
10	13164661922

Infine il valore di  $I_{c,om,x}$  risulta pari a  $1.9331e+12$  mm<sup>4</sup>.

Noti i valori di  $\sigma_{c,sup}$ ,  $\sigma_{c,inf}$ ,  $A_{c,om}$ ,  $I_{c,om,x}$ ,  $y_{sup}$  e  $y_{inf}$ , è possibile risolvere il sistema di due equazioni in due incognite e conoscere i valori di  $N1^*$  e  $M1^*$  che generano lo stato tensione presente nel primo contributo.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{c,sup} \\ \sigma_{c,inf} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{A_{c,om}} & \frac{y_{sup}}{I_{c,om,x}} \\ \frac{1}{A_{c,om}} & \frac{y_{inf}}{I_{c,om,x}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} N1^* \\ M1^* \end{vmatrix}$$

Tale sistema viene risolto con l'utilizzo del software Matlab2012. I valori di  $N1^*$  e  $M1^*$  risultano rispettivamente  $-38.9e+6$  N e  $8840.7e+6$  Nmm.



**Figura 5.1.7 : Videata di Matlab2012 sul calcolo di  $N1^*$  e  $M1^*$**

L'artificio matematico del Metodo Alternativo prevede successivamente che al momento  $M1^*$  si aggiunga la variazione di momento causata dai carichi variabili mobili  $\Delta M$ . In questo modo la sezione diventa soggetta alle sollecitazioni  $N1^*$  e  $M1^* + \Delta M$ . Ora il calcolo delle tensioni viene eseguito per una sezione presso inflessa omogeneizzata parzializzata (secondo stadio). Solo la porzione superiore di calcestruzzo  $x_c$  ed i cavi di precompressione reagiscono alle sollecitazioni. Le equazioni da risolvere per conoscere  $x_c$  sono le seguenti.

$$y_X = \frac{I_{n,om,II}}{S_{n,om,II}}$$

$$y_X = x_c + (e - y_G)$$

Dove:

- $y_X$  è la distanza di  $N1^*$  eccentrico dall'asse di separazione  $n$  della sezione;
- $e$  è l'eccentricità di  $N1^*$  rispetto al baricentro della sezione come se fosse tutta di calcestruzzo  $G_{c,tt}$ ; e è pari a  $(M1^* + \Delta M)/N1^*$ ;
- $y_G$  è la distanza del baricentro  $G_{c,tt}$  dall'estradosso della trave;
- $I_{n,om,II}$  è il momento d'inerzia della sezione omogeneizzata al secondo stadio rispetto all'asse di separazione  $n$  della sezione;



Anche in questo caso per il calcolo del momento d'inerzia  $I_{n,om,II}$  della sezione omogeneizzata al secondo stadio rispetto all'asse di separazione n si opta per scomporre la porzione superiore di calcestruzzo reagente in geometrie elementari. Ancora una volta si ricorre al teorema di Huygens-Steiner per il calcolo dei momenti d'inerzia di tali geometrie rispetto all'asse n. Nota la geometria della sezione trasversale, il momento d'inerzia  $I_n^e$  dell'i-esima geometria elementare rispetto all'asse orizzontale di separazione n è in funzione di  $x_c$ , come mostrano le seguenti espressioni.

$$I_n^7 = \frac{x_c^3}{3} * 10350$$

$$I_n^1 = (2575 * \frac{150^3}{36}) + 193125 * \left\{ (x_c - \left[ 200 + \left( \frac{2}{3} * 150 \right) \right]) \right\}^2$$

$$I_n^2 = 2575 * \frac{(x_c - 350)^3}{3}$$

$$I_n^3 = a * \frac{(x_c - 350)^3}{36} + \frac{(x_c - 350) * a}{2} * \left\{ x_c - \left[ 350 + \frac{2 * (x_c - 350)}{3} \right] \right\}^2$$

$$a = 350 * \frac{(x_c - 350)}{1150}$$

Infine, il valore di  $x_c$  si trova per iterazione risolvendo la seguente uguaglianza.

$$x_c + (e - y_G) = \frac{I_{n,om,II}}{S_{n,om,II}}$$

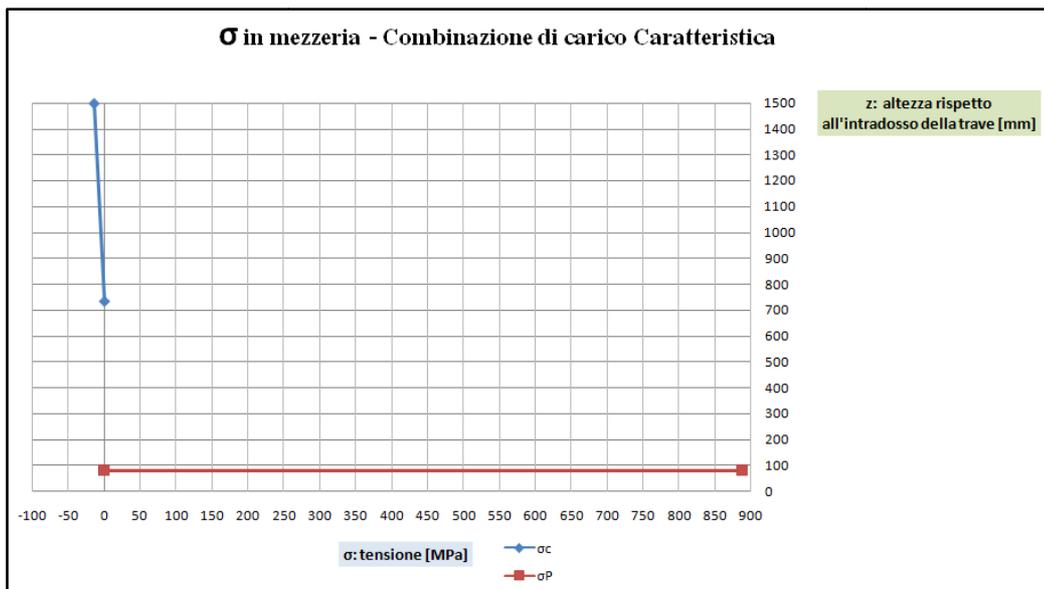
Con l'aiuto del comando *Analisi di simulazione – Ricerca obiettivo* del software di calcolo Excel si ricava il valore di  $x_c$  pari a 765.9 mm.

Noto  $x_c$  diventa possibile calcolare le tensioni presenti sulla sezione di mezzeria nella combinazione Caratteristica. In merito il Metodo Alternativo propone l'unione dello stato di sollecitazione dipendente da  $x_c$  trovato con lo stato di sollecitazione nel secondo contributo dipendente unicamente dallo sforzo di trazione presente nei cavi di precompressione. Le formulazioni fornite dal Metodo Alternativo sono le seguenti:

$$\sigma_c = \frac{N1^*}{S_{n,om,II}} * x_c$$

$$\sigma_p = \alpha_E * \left[ \frac{N1^*}{S_{n,om,II}} * (d - x_c) \right] + \sigma_{p,qp} - \alpha_E \sigma_{cp,qp}$$

Nella combinazione Caratteristica le tensioni  $\sigma_c$  e  $\sigma_p$  presenti sulla sezione fessurata risultano rispettivamente -14.72 MPa e 888.27 MPa. La verifica tensionale allo SLE Rara viene soddisfatta:  $\sigma_c$  è minore di  $0.60f_{ck}$ , pari a 19.98 MPa, e  $\sigma_p$  è sia minore di  $0.60f_{ptk}$ , pari a 1080 MPa, limite di normativa all'epoca di costruzione, che minore di  $0.80f_{pyk}$ , pari a 1296 MPa, limite di normativa alla data odierna. Di seguito si riporta il digramma delle tensioni sulla sezione di mezzeria nella combinazione Caratteristica.



**Grafico 5.1.5 : Tensioni nella sezione di mezzeria nella combinazione di carico Caratteristica**

## 5.2 Output dell'analisi strutturale del modello della trave con i 26 cavi

La scelta dei cavi assenti nel modello è stata pensata, come si è detto, in modo tale da confrontare gli effetti causati dalla rottura di cavi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato, gli effetti causati dalla rottura di cavi asimmetrici posizionati su lati opposti dell'asse dell'impalcato e gli effetti causati dalla rottura di cavi posizionati

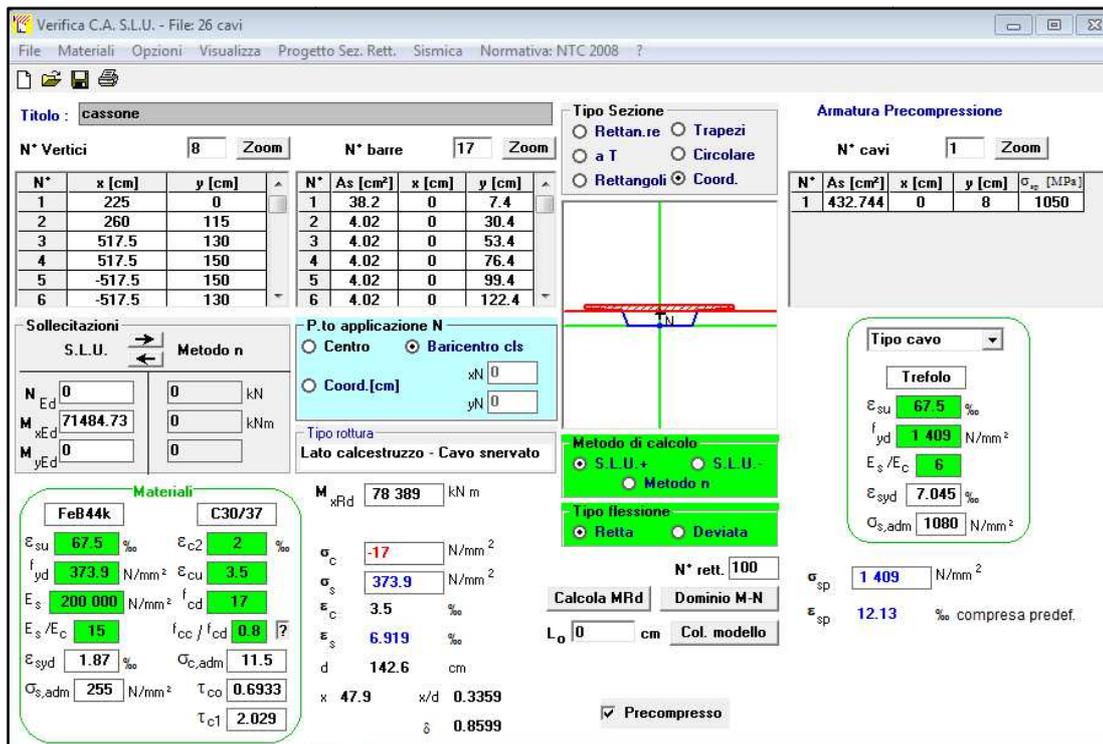
sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato. Per ognuna di queste configurazioni si ricava lo stato tensionale presente nella sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente sotto l'intervento degli effetti reologici del calcestruzzo. Inoltre per conoscere il margine di sicurezza restante della sezione di mezzeria si effettua la verifica allo SLU in assenza di due cavi di precompressione.

### *5.2.1 Verifiche allo SLU*

Analogamente a quanto visto per il modello della trave con i 28 cavi di precompressione, si verificherà che il momento sollecitante  $M_{Ed}$  sia minore o uguale al momento resistente  $M_{Rd}$  della sezione di mezzeria. Il momento sollecitante  $M_{Ed}$  viene estratto dall'analisi strutturale del modello della trave con i 28 cavi nella combinazione SLU fondamentale. La precompressione in tale combinazione non è stata considerata, dal momento che la trave è semplicemente appoggiata ed isostatica. Perciò la perdita di precompressione dovuta alla rottura di due cavi non altera il momento sollecitante  $M_{Ed}$  nella combinazione SLU fondamentale. Il momento sollecitante  $M_{Ed}$  nella sezione di mezzeria dall'analisi strutturale è risultato pari a 71484.73 kNm.

Successivamente si è calcolato il momento resistente  $M_{Rd}$ . Per il calcolo del momento resistente della sezione si è utilizzato il software VcaSlu. Nel calcolo del momento resistente della sezione di mezzeria vengono tenute in conto oltre ai cavi di precompressione anche le armature lente presenti nella sezione. Infatti si tratta di una precompressione parziale.

Si rimanda a quanto eseguito per il modello della trave con i 28 cavi, per quanto riguarda il procedimento per l'assegnazione su VcaSlu delle caratteristiche geometriche della sezione, dei materiali, delle armature lente e dei cavi di precompressione. La differenza sta nella minore area  $A_p$  disponibile dai cavi di precompressione. Il valore di  $A_p$  dei 26 cavi di precompressione risulta pari a 43274.4 mm<sup>2</sup>.



**Figura 5.2.1 : Momento resistente nella sezione di mezzeria nella combinazione allo SLU fondamentale in assenza di due cavi di precompressione**

Il momento resistente della sezione di mezzeria  $M_{Rd}$  è naturalmente diminuito ed è pari a 78389 kNm. Dal momento che  $M_{Ed}$  risulta minore di  $M_{Rd}$ , la verifica allo SLU è ancora soddisfatta in assenza di due cavi di precompressione. Tuttavia, il coefficiente di sicurezza  $CS$ , pari a  $M_{Rd}/M_{Ed}$ , si è ridotto. Il valore di  $CS$  è risultato pari a 1.10 con un margine di sicurezza del 10%. In presenza di una probabile rottura di altri cavi il momento resistente residuo in presenza dei 26 cavi non garantisce lo stesso livello di sicurezza caratterizzante la trave con i 28 cavi di precompressione.

### 5.2.2 Verifiche allo SLE

Le verifiche tensionali allo SLE sono state effettuate al tempo infinito (70anni), già scontati gli effetti reologici di fluage e ritiro del calcestruzzo. Nel modello della trave con i 26 cavi di precompressione la combinazione delle azioni allo SLE analizzata è stata la combinazione Quasi Permanente.

In accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni nella combinazione Quasi Permanente la verifica viene eseguita per la tensione presente nel calcestruzzo e risulta soddisfatta quando  $\sigma_c \leq 0.45f_{ck}$ .

Inoltre viene verificata la tensione massima di trazione del calcestruzzo  $\sigma_t$ . Trattandosi di una precompressione parziale,  $\sigma_t$  deve risultare minore o uguale di  $f_{ct}$  (o  $f_{ctm}$ ) nella combinazione Quasi Permanente. Il valore di  $f_{ct}$ , resistenza a trazione del calcestruzzo, deriva da  $f_{ck}$  ed è valutato con la seguente espressione.

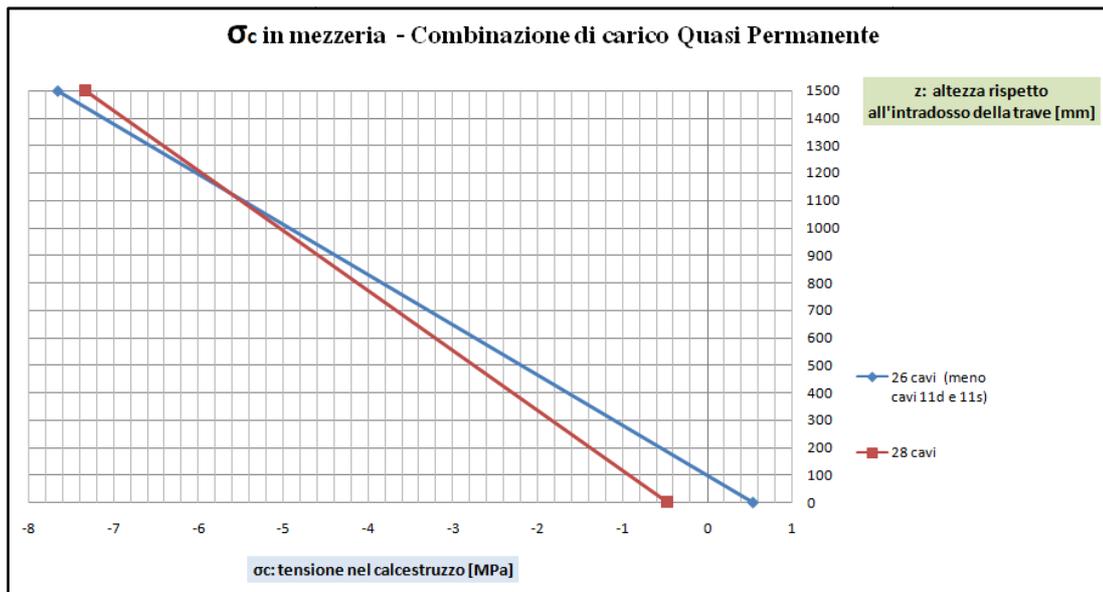
$$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{2/3}$$

Il valore di  $f_{ct}$ , dunque, risulta pari a 3.1 MPa.

#### *5.2.2.1 Verifiche tensionali allo SLE nella combinazione Quasi Permanente*

*Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato:*

Dall'analisi strutturale del modello della trave con la perdita dei carichi statici di precompressione 11d e 11s è stato possibile estrarre i valori di  $\sigma_c$  per la sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente. In realtà il programma restituisce le tensioni sul calcestruzzo in ogni sezione della trave (ved. Allegato H). Per maggiore facilità di confronto con i limiti stabiliti dalle normative i valori sono stati diagrammati su Excel. Per mettere in evidenza gli effetti causati dalla rottura dei due cavi di precompressione, su Excel sono state diagrammate in parallelo anche le tensioni presenti sul calcestruzzo nella situazione della trave integra con 28 cavi di precompressione nella combinazione di carico Quasi Permanente.



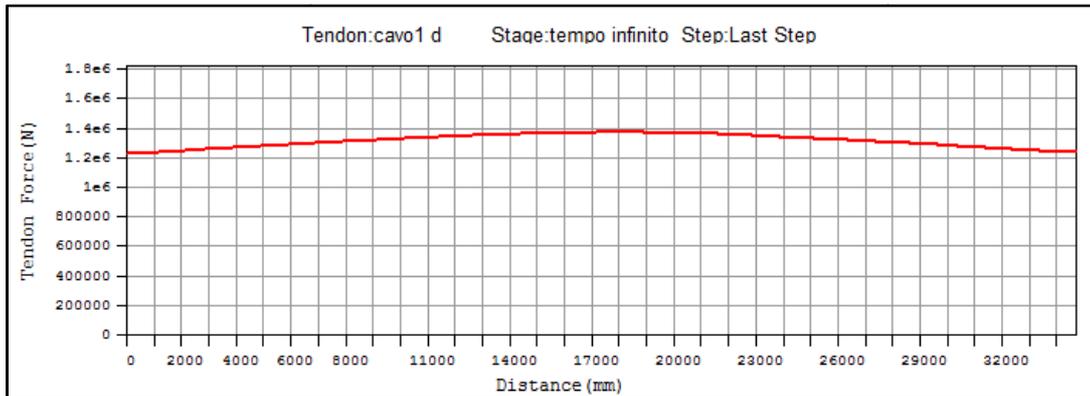
**Grafico 5.2.1 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione di carico Quasi Permanente**

Si nota come la perdita di precompressione causa un peggioramento sullo stato di sollecitazione del calcestruzzo. La sezione di mezzeria, che nella situazione originaria di progetto era tutta compressa, ora è sottoposta ad uno sforzo di trazione all'intradosso della trave ed ad un maggiore sforzo di compressione all'estradosso della trave.

La verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di trazione ammessa  $f_{ct}$  risulta ancora soddisfatta nella situazione della trave con 26 cavi di precompressione, dal momento che  $\sigma_t$  pari a 0.53 MPa risulta inferiore di  $f_{ct}$ . Anche la verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di compressione ammessa  $0.45f_{ck}$ , pari a 14.985 MPa, risulta soddisfatta, dal momento che  $\sigma_c$  pari a 7.66 MPa risulta minore di quest'ultima.

Con l'utilizzo di MIDAS CIVIL è possibile conoscere nella combinazione Quasi Permanente la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione  $\sigma_p$  per il modello della trave in assenza dei cavi 11d e 11s. Il cavo di precompressione scelto come riferimento per la sezione di mezzeria è il cavo 1d, così denominato al momento della definizione dei tracciati dei 28 cavi. La scelta del cavo di riferimento è stata influenzata dal fatto che quest'ultimo dopo la fase di tesatura presentava, come si è detto, uno sforzo di trazione maggiore rispetto agli altri cavi. Grazie anche

alla sua posizione all'estremità della sezione di mezzeria, esso è stato ritenuto un buon punto di rilievo. Inoltre dai saggi esplorativi esso non aveva subito danneggiamenti e quindi il valore ricavato dal modello per quel cavo è stato considerato più vicino alla situazione in situ.



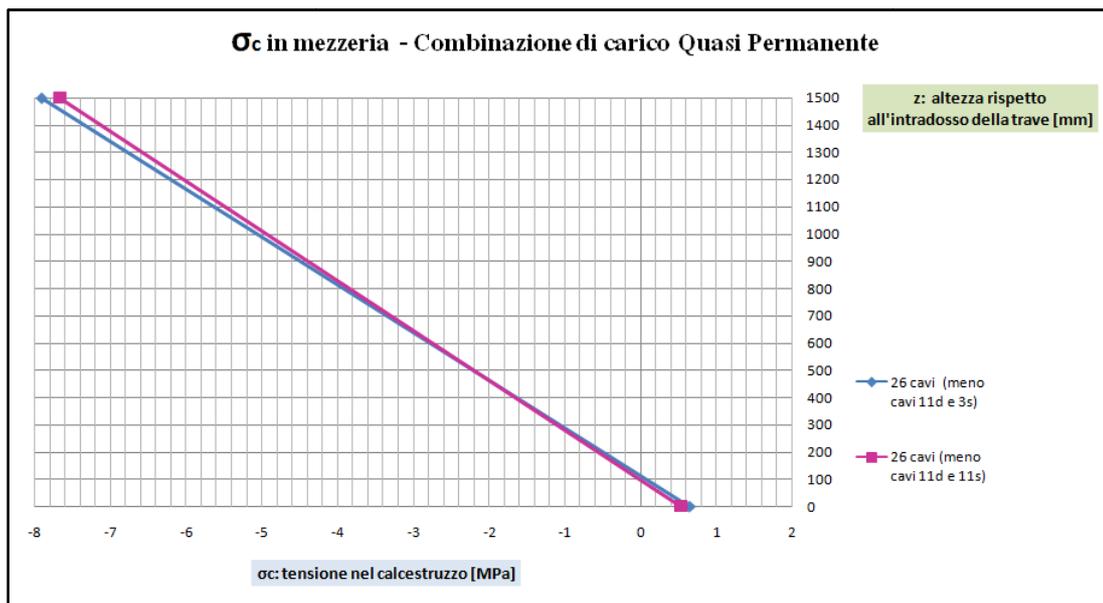
**Figura 5.2.2 : Sforzo di trazione presente lungo il cavo 1d nella combinazione allo SLE Quasi Permanente in assenza dei cavi 11d e 11s**

Lo sforzo massimo di trazione all'interno del cavo 1d in corrispondenza della sezione di mezzeria è pari a  $1.37e+6$  N. La  $\sigma_p$ , dunque, è pari a  $F/A_{cavo}$ , con un valore di 822.68 MPa. E' possibile notare come la precompressione impressa inizialmente da ciascun cavo pari a 1050 MPa è diminuita, a causa del rientro degli ancoraggi di testata, del rilassamento subito dall'acciaio nel tempo e degli effetti reologici del calcestruzzo sotto carico (fluage e ritiro) che non contrasta con la stessa intensità iniziale l'azione del cavo in tensione che tende a tornare al suo stato iniziale antecedente la sua tesatura. Inoltre, ricordando il valore di  $\sigma_p$  per il modello della trave con 28 cavi di precompressione nella combinazione Quasi Permanente, pari a 810.48 MPa, si evidenzia un incremento di tensione all'interno del cavo 1d. Tale aumento di tensione è ragionevole dal momento che lo sforzo è distribuito su un numero inferiore di cavi (26 cavi).

*Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione asimmetrici rispetto all'asse dell'impalcato:*

Dall'analisi strutturale del modello della trave con la perdita dei carichi statici di precompressione 11d e 3s è stato possibile estrarre i valori di  $\sigma_c$  per la sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente. In realtà il programma restituisce le

tensioni sul calcestruzzo in ogni sezione della trave (ved. Allegato I). Per maggiore facilità di confronto con i limiti stabiliti dalle normative i valori sono stati diagrammati su Excel. Per mettere in evidenza gli effetti causati dalla rottura di due cavi di precompressione asimmetrici rispetto all'asse dell'impalcato, su Excel sono state diagrammate in parallelo le tensioni presenti sul calcestruzzo nella situazione della trave con la rottura dei cavi 11d e 11s nella combinazione di carico Quasi Permanente.



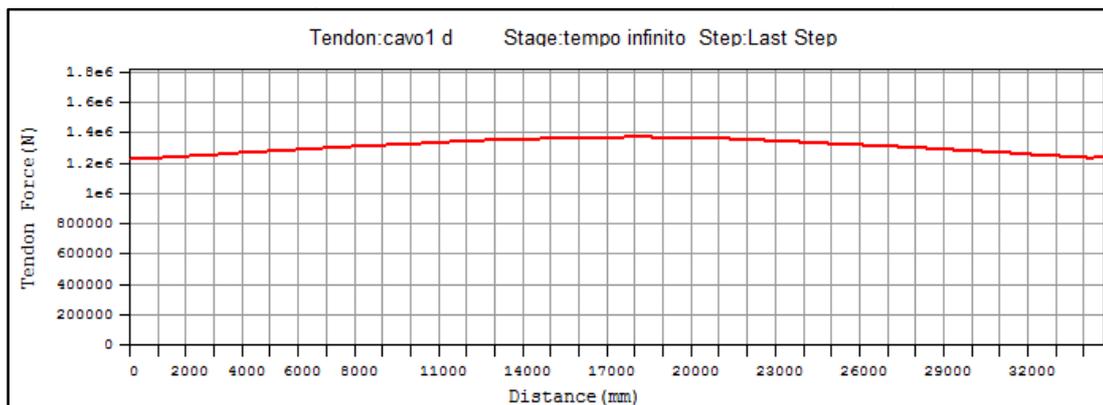
**Grafico 5.2.2 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione di carico Quasi Permanente**

Si nota come rispetto alla perdita di due cavi di precompressione simmetrici la perdita di due cavi asimmetrici è peggiore riguardo allo stato di sollecitazione del calcestruzzo. La sezione di mezzeria è sottoposta ad uno sforzo di trazione maggiore all'intradosso della trave ed ad un maggiore sforzo di compressione all'estradosso della trave.

La verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di trazione ammessa  $f_{ct}$  risulta ancora soddisfatta nella situazione della trave con la rottura di due cavi asimmetrici, dal momento che  $\sigma_t$  pari a 0.64 MPa risulta inferiore di  $f_{ct}$ . Anche la verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione

massima di compressione ammessa  $0.45f_{ck}$ , pari a 14.985 MPa, risulta soddisfatta, dal momento che  $\sigma_c$  pari a 7.91 MPa risulta minore di quest'ultima.

Con l'utilizzo di MIDAS CIVIL è possibile conoscere nella combinazione Quasi Permanente la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione  $\sigma_p$  per il modello della trave in assenza dei cavi 11d e 3s. Il cavo di precompressione scelto come riferimento per la sezione di mezzeria è il cavo 1d, così denominato al momento della definizione dei tracciati dei 28 cavi. La scelta del cavo di riferimento è stata influenzata dal fatto che quest'ultimo dopo la fase di tesatura presentava uno sforzo di trazione maggiore rispetto agli altri cavi. Grazie anche alla sua posizione all'estremità della sezione di mezzeria, esso è stato ritenuto un buon punto di rilievo. Inoltre dai saggi esplorativi esso non aveva subito danneggiamenti e quindi il valore ricavato dal modello per quel cavo è stato considerato più vicino alla situazione in situ.



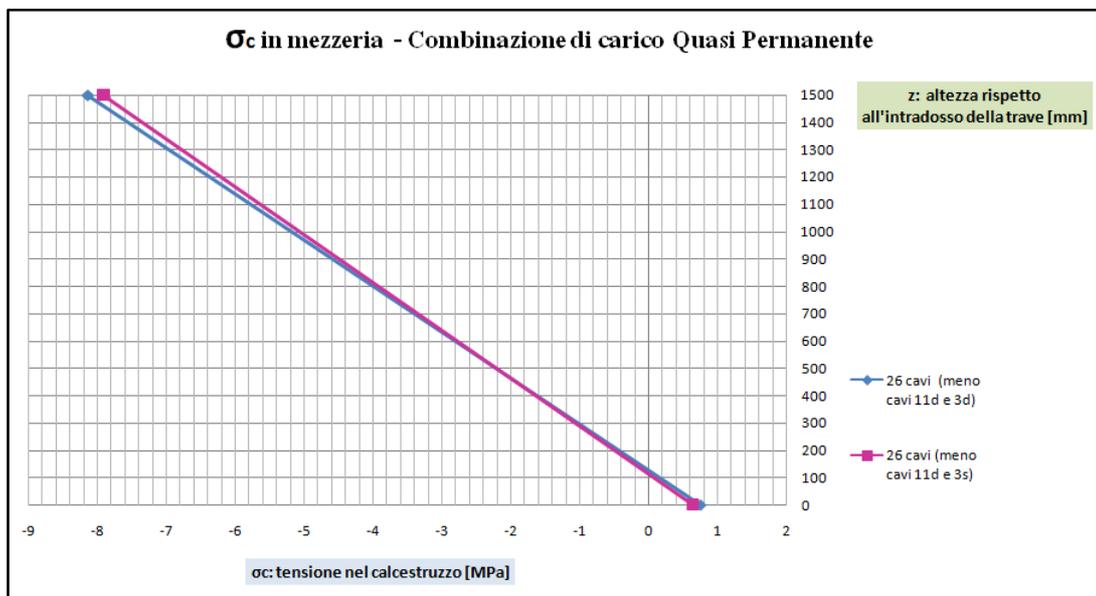
**Figura 5.2.3 : Sforzo di trazione presente lungo il cavo 1d nella combinazione allo SLE Quasi Permanente in assenza dei cavi 11d e 3s**

Lo sforzo massimo di trazione all'interno del cavo 1d in corrispondenza della sezione di mezzeria è pari a  $1.369e+6$  N. La  $\sigma_p$ , dunque, è pari a  $F/A_{cavo}$ , con un valore di 820.74 MPa. E' possibile notare come la precompressione impressa inizialmente da ciascun cavo pari a 1050 MPa è diminuita, a causa del rientro degli ancoraggi di testata, del rilassamento subito dall'acciaio nel tempo e degli effetti reologici del calcestruzzo sotto carico (fluage e ritiro) che non contrasta con la stessa intensità iniziale l'azione del cavo in tensione che tende a tornare al suo stato iniziale antecedente la sua tesatura. Inoltre, ricordando il valore di  $\sigma_p$  per il modello della

trave in assenza dei cavi 11d e 11s nella combinazione Quasi Permanente, pari a 822.68 MPa, si evidenzia un decremento di tensione all'interno del cavo 1d. Tale riduzione di tensione è ragionevole dal momento che il baricentro globale dei cavi di precompressione rotti si sposta e si allontana dal cavo 1d. Le sollecitazioni degli sforzi si concentrano vicino al baricentro globale dei cavi di precompressione rotti.

*Modello della trave con la perdita di 2 cavi di precompressione posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato:*

Dall'analisi strutturale del modello della trave con la perdita dei carichi statici di precompressione 11d e 3d è stato possibile estrarre i valori di  $\sigma_c$  per la sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente. In realtà il programma restituisce le tensioni sul calcestruzzo in ogni sezione della trave (ved. Allegato J). Per maggiore facilità di confronto con i limiti stabiliti dalle normative i valori sono stati diagrammati su Excel. Per mettere in evidenza gli effetti causati dalla rottura di due cavi di precompressione posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato, su Excel sono state diagrammate in parallelo le tensioni presenti sul calcestruzzo nella situazione della trave con la rottura dei cavi 11d e 3s nella combinazione di carico Quasi Permanente.

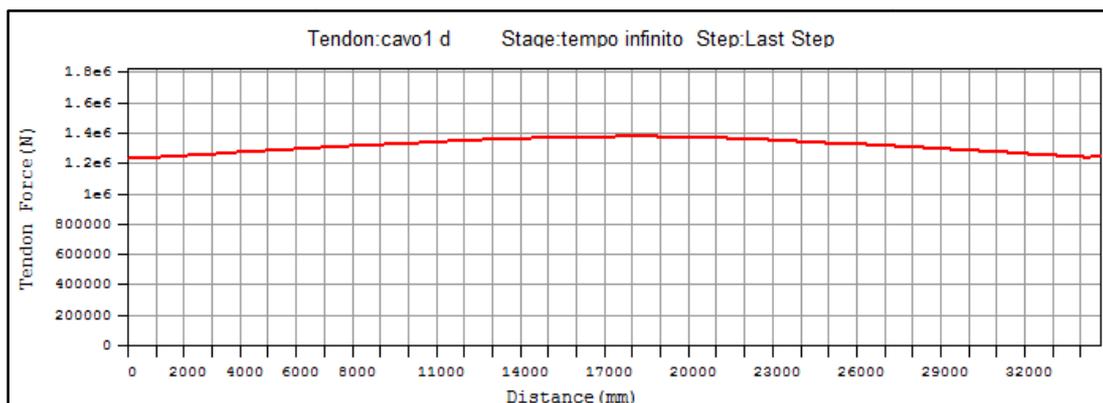


**Grafico 5.2.3 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione di carico Quasi Permanente**

Si nota come rispetto alla perdita di due cavi di precompressione asimmetrici la perdita di due cavi posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato è peggiore riguardo allo stato di sollecitazione del calcestruzzo. La sezione di mezzeria è sottoposta ad uno sforzo di trazione maggiore all'intradosso della trave ed ad un maggiore sforzo di compressione all'estradosso della trave.

La verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di trazione ammessa  $f_{ct}$  risulta ancora soddisfatta nella situazione della trave con la rottura di due cavi posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato, dal momento che  $\sigma_t$  pari a 0.74 MPa risulta inferiore di  $f_{ct}$ . Anche la verifica tensionale sul calcestruzzo nei confronti della tensione massima di compressione ammessa  $0.45f_{ck}$ , pari a 14.985 MPa, risulta soddisfatta, dal momento che  $\sigma_c$  pari a 8.14 MPa risulta minore di quest'ultima.

Con l'utilizzo di MIDAS CIVIL è possibile conoscere nella combinazione Quasi Permanente la tensione di trazione presente nel cavo di precompressione  $\sigma_p$  per il modello della trave in assenza dei cavi 11d e 3d. Per gli stessi motivi descritti precedentemente il cavo di precompressione scelto come riferimento per la sezione di mezzeria è il cavo 1d, così denominato al momento della definizione dei tracciati dei 28 cavi.

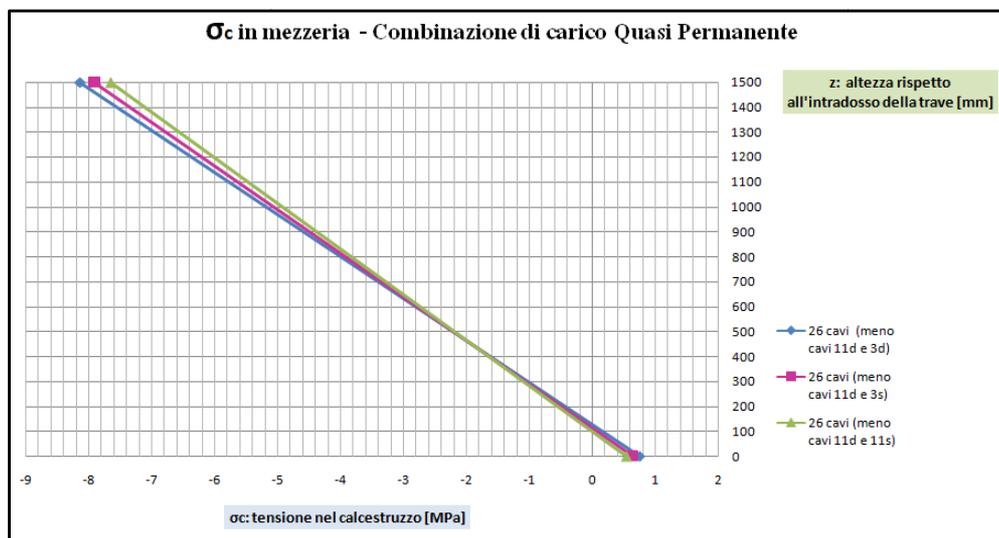


**Figura 5.2.4 : Sforzo di trazione presente lungo il cavo 1d nella combinazione allo SLE Quasi Permanente in assenza dei cavi 11d e 3d**

Lo sforzo massimo di trazione all'interno del cavo 1d in corrispondenza della sezione di mezzeria è pari a 1.376e+6 N. La  $\sigma_p$ , dunque, è pari a  $F/A_{cavo}$ , con un

valore di 824.94 MPa. E' possibile notare come la precompressione impressa inizialmente da ciascun cavo pari a 1050 MPa è diminuita, a causa del rientro degli ancoraggi di testata, del rilassamento subito dall'acciaio nel tempo e degli effetti reologici del calcestruzzo sotto carico (fluage e ritiro) che non contrasta con la stessa intensità iniziale l'azione del cavo in tensione che tende a tornare al suo stato iniziale antecedente la sua tesatura. Inoltre, ricordando il valore di  $\sigma_p$  per il modello della trave in assenza dei cavi 11d e 11s nella combinazione Quasi Permanente, pari a 822.68 MPa, ed il valore di  $\sigma_p$  per il modello della trave in assenza dei cavi 11d e 3s nella combinazione Quasi Permanente, pari a 820.74 MPa, si evidenzia un incremento di tensione all'interno del cavo 1d. Tale incremento di tensione è ragionevole dal momento che il baricentro globale dei cavi di precompressione rotti si sposta e si avvicina al cavo 1d. Le sollecitazioni degli sforzi si concentrano vicino al baricentro globale dei cavi di precompressione rotti.

Diagrammando su Excel tutte e tre le situazioni di rottura dei cavi di precompressione analizzate, è possibile accorgersi che gli effetti causati dai tre tipi di rottura differiscono tra loro di poco.



**Grafico 5.2.4 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione di carico Quasi Permanente in presenza di 26 cavi**

In particolare il maggiore scostamento dalla situazione di rottura di due cavi simmetrici è dato dalla situazione di rottura di due cavi posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato. La differenza di tensione è pari 0.48 MPa e corrisponde al

6% della tensione di compressione presente sul calcestruzzo nella situazione di rottura di due cavi di precompressione posizionati sullo stesso lato dell'asse dell'impalcato. Essendo tale percentuale minore del 10%, si è concluso che, al momento in cui vengano a mancare due cavi di precompressione, qualsiasi sia la loro posizione gli effetti dovuti alla perdita di precompressione sono quasi corrispondenti. Inoltre gli effetti causati dalla rottura di due cavi di precompressione sulla trave sono molto piccoli in confronto agli effetti della tensione esercitata dai cavi restanti (2/26).

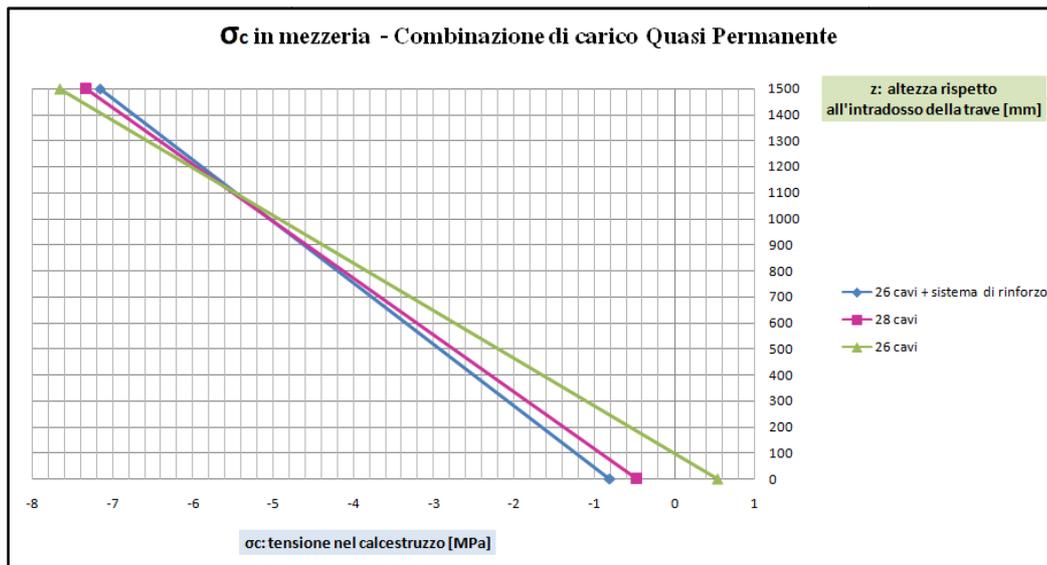
In conclusione le verifiche allo SLE Quasi Permanente risultano soddisfatte ancora nel modello della trave con 26 cavi di precompressione. Tuttavia, il margine di sicurezza a fronte del possibile raggiungimento della tensione massima di trazione ammessa  $f_{ct}$  si è ridotto. Parallelamente anche il margine di sicurezza a fronte del possibile raggiungimento della tensione massima di compressione ammessa  $0.45f_{ck}$  è diminuito. In presenza di una probabile rottura di altri cavi non è quindi garantito lo stesso margine di sicurezza caratterizzante la trave con i 28 cavi di precompressione.

### **5.3 Output dell'analisi strutturale del modello della trave nella situazione futura di restauro**

Per valutare l'efficacia teorica dell'intervento di rinforzo, si esegue l'analisi strutturale del modello della trave nella situazione futura di restauro della trave con 26 cavi attivi ed in presenza di 18 cavi di precompressione esterna che costituiscono il sistema di rinforzo attivo caratterizzato dalle 18 lastre pultruse CFRP placcate all'intradosso della trave da ponte e pretese.

#### *5.3.1 Verifiche allo SLE*

In riferimento alla combinazione di carico Quasi Permanente allo SLE l'analisi strutturale del modello della trave rinforzata restituisce in mezzeria un recupero di compressione all'intradosso della trave analogo in valore alla decompressione indotta dalla rottura dei due cavi di precompressione interna (ved. Allegato N).



**Grafico 5.3.1 : Tensioni sul calcestruzzo nella sezione di mezzeria nella combinazione Quasi Permanente nella situazione della trave rinforzata**

Il valore della decompressione indotta dalla rottura dei due cavi di precompressione interna è pari a 1.0 MPa ed il valore del recupero di compressione indotto dal sistema di rinforzo è pari a 1.3 MPa.

Inoltre lo stato di sollecitazione nel calcestruzzo all'applicazione dei carichi variabili mobili, nella combinazione di carico Caratteristica allo SLE, risulterà inferiore a quello antecedente alla rottura dei cavi di precompressione interna, tenendo in conto lo sforzo assorbito dalle lastre pultruse CFRP placcate all'intradosso della trave e costituenti rinforzi esterni aderenti.

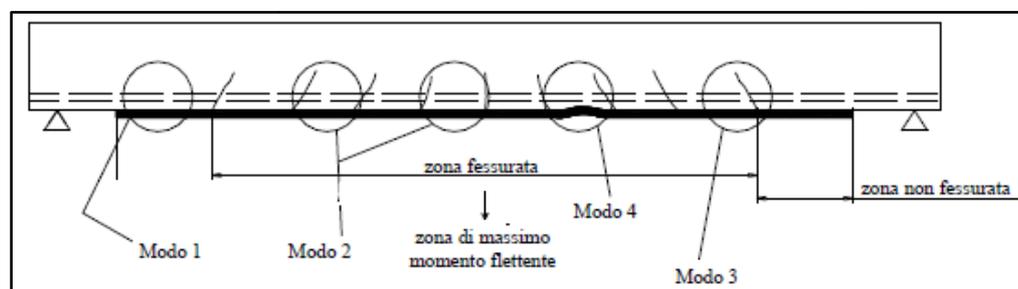
Dunque l'innovativo sistema di rinforzo adottato riporta le condizioni di servizio caratterizzanti la trave nella situazione originaria e persino le migliora. Nella condizione di futuro restauro con lo *StressHead-CarboStress post-tensioning system* il margine di sicurezza che caratterizza il soddisfacimento delle verifiche tensionali è maggiore rispetto al margine di sicurezza che caratterizza il soddisfacimento delle verifiche tensionali nella situazione della trave integra con i 28 cavi di precompressione interna.

### 5.3.2 Verifiche allo SLU

In accordo alle Istruzioni delineate dal CNR, nell'intervento di rinforzo adottato e caratterizzato da lastre pultruse CFRP placcate all'intradosso della trave, il ruolo dell'aderenza tra calcestruzzo e composito assume una grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per distacco dal supporto è di tipo fragile. Nello spirito del criterio della gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere il collasso per flessione o per taglio dell'elemento rinforzato. In linea di principio il distacco del composito dal supporto può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo nel caso di strati sovrapposti di composito. Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, poiché la resistenza a taglio dell'adesivo è in genere molto più elevata di quella del calcestruzzo, la rottura si produce all'interno di quest'ultimo con asportazione di uno strato di materiale di spessore variabile da pochi millimetri fino ad interessare l'intero copriferro. Inoltre il collasso per distacco dal supporto del rinforzo a flessione può avvenire in uno dei seguenti quattro modi.

- Modo 1 (Distacco di estremità);
- Modo 2 (Distacco intermedio causato da fessure per flessione nella trave);
- Modo 3 (Distacco causato da fessure diagonali da taglio nella trave);
- Modo 4 (Distacco causato da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo).

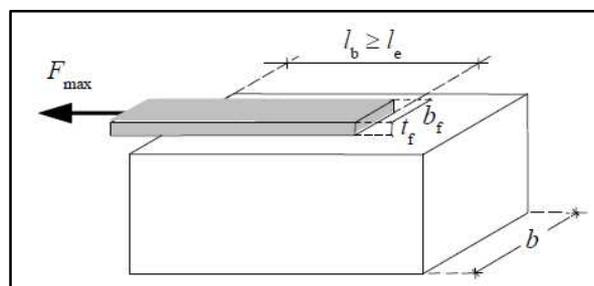
Nella seguente Figura vengono rappresentati i quattro modi di rottura per distacco dal supporto del rinforzo a flessione.



**Figura 5.3.1 : Modi di rottura per distacco dal supporto del rinforzo a flessione**

In particolare si esegue la verifica allo SLU nella sezione di mezzeria della trave rinforzata nei confronti del collasso per distacco intermedio causato da fessure per

flessione nella trave. La verifica allo SLU nei confronti della crisi per distacco intermedio richiede la valutazione della massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo. Con riferimento ad una tipica prova di aderenza il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri il distacco dal supporto, dipende dalla lunghezza di ancoraggio  $l_b$ . Tale valore cresce con  $l_b$  fino a raggiungere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza di ancoraggio  $l_e$ : ulteriori aumenti della lunghezza di ancoraggio non comportano incrementi della forza trasmessa. La lunghezza  $l_e$  viene definita lunghezza ottimale di ancoraggio. Essa corrisponde alla lunghezza minima di ancoraggio che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.



**Figura 5.3.2 : Tipica prova di aderenza**

In alternativa, è possibile l'impiego di connettori meccanici, come nel caso del sistema di rinforzo utilizzato, dotato degli ancoraggi StressHead. In accordo alle Istruzioni delineate dal CNR i sistemi tecnologici utilizzati per l'ancoraggio delle estremità delle lastre devono essere oggetto di idonee indagini sperimentali condotte secondo criteri normalizzati. La società svizzera StressHead AG ha eseguito prove sperimentali di pull-out e ha valutato una massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo maggiore di quella calcolata analiticamente, consentendo valori più elevati della massima tensione alla quale il composito può lavorare senza che si verifichi il distacco intermedio.

### 5.3.2.1 Proprietà dei materiali e relativi valori di calcolo

I valori delle proprietà dei materiali preesistenti nella trave da rinforzare sono stati precedentemente desunti dai risultati delle prove *in situ* e in laboratorio eseguite per la fase di caratterizzazione della trave. In accordo con la Normativa vigente, i valori

da utilizzare per quantificare la resistenza e la deformazione ultima dei materiali preesistenti sono i valori medi. I valori da attribuire ai moduli elastici dei materiali preesistenti sono ancora i valori medi. Il valore di calcolo della generica proprietà di un materiale preesistente è ottenuto a partire dal rapporto tra il valore medio di quella proprietà ed un opportuno fattore di confidenza  $FC$  commisurato al livello di conoscenza perseguito. Tale rapporto può essere eventualmente ancora diviso per il coefficiente parziale del materiale laddove previsto dalla normativa vigente.

I valori da utilizzare per quantificare la resistenza e la deformazione ultima dei materiali FRP sono quelli caratteristici (frattile 5%). I valori da attribuire ai moduli elastici dei materiali FRP sono invece i valori medi. Il valore di calcolo  $x_d$  della generica proprietà di resistenza o di deformazione ultima di un materiale FRP è ottenuto dalla seguente espressione.

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

Dove:

- $\eta$  è il fattore di conversione;
- $x_k$  è il valore caratteristico della proprietà in questione;
- $\gamma_m$  è il coefficiente parziale del materiale FRP.

Nei casi in cui è stata considerata sia l'influenza dei fattori ambientali che quella dei carichi di lunga durata (SLE), il fattore di conversione  $\eta$  si è ottenuto 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 viene considerata l'influenza dei soli fattori ambientali (SLU), il fattore di conversione  $\eta$  coincide con  $\eta_a$ . I valori assunti di  $\eta_a$  e  $\eta_l$  sono riportati nella seguente Tabella.

<b>Condizione di esposizione</b>	<b>Tipo di fibra/resina</b>	<b><math>\eta_a</math></b>
Esterna	Carbonio/epossidica	0.85
<b>Modalità di carico</b>		
	<b>Tipo di fibra/resina</b>	<b><math>\eta_l</math></b>
Carico di lungo termine	Carbonio/epossidica	0.8

I coefficienti parziali  $\gamma_m$  per i materiali FRP nei riguardi degli SLE hanno assunto il valore unitario. Nei riguardi degli SLU al coefficiente parziale  $\gamma_m$  dei materiali FRP viene attribuito il valore 1.10 ( $\gamma_f$ ). I valori assunti dai coefficienti parziali per i modelli di resistenza a flessione nei riguardi degli SLU sono l'unità.

### 5.3.2.2 *Generalità sulla verifica allo SLU nei confronti del collasso per distacco intermedio causato da fessure per flessione*

La verifica allo SLU nella sezione di mezzeria della trave rinforzata viene soddisfatta quando il momento resistente di progetto della sezione rinforzata  $M_{Rd}$  è maggiore di quello sollecitante di progetto  $M_{Ed}$ . In accordo alle Istruzioni delineate dal CNR l'incremento della capacità di progetto della trave rinforzata non può risultare superiore del 50% rispetto a quella della trave non rinforzata.

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU della sezione di mezzeria rinforzata dalle 18 lastre pultruse CFRP 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 (armatura lenta - calcestruzzo, cavi di post-tensione - calcestruzzo, rinforzo - calcestruzzo);
- Resistenza a trazione nulla del calcestruzzo;
- Legame costitutivo del calcestruzzo parabola rettangolo;
- Legame costitutivo dell'acciaio armonico di precompressione elastico perfettamente plastico;
- Legame costitutivo dell'acciaio dell'armatura lenta elastico perfettamente plastico;
- Legame costitutivo del composito in CFRP elastico lineare fino a rottura.

Si ipotizza che il meccanismo di collasso a flessione si manifesti in due modalità, a seconda che si raggiunga la massima deformazione a trazione nel rinforzo di CFRP o la massima deformazione a compressione nel calcestruzzo (3.5 ‰). La massima deformazione a trazione del rinforzo  $\epsilon_{fd}$  è legata alla massima tensione alla quale il composito può lavorare senza che si verifichi il distacco intermedio ed è ricavata dalla seguente espressione:

$$\eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f}$$

$\epsilon_{fk}$  rappresenta la deformazione caratteristica ultima della lastra pultrusa CFRP. Il valore di  $\epsilon_{fk}$  è ottenuto dal rapporto tra la resistenza caratteristica a rottura  $f_{fk}$  della lastra pultrusa CarboDur S626 ed il suo modulo elastico  $E_f$ . Il valore di  $\epsilon_{fk}$  risulta pari a 17.0 ‰ ed il valore di  $\epsilon_{fd}$  risulta pari a 13.1 ‰.

Per entrambi i tipi di rottura, lato rinforzo o lato calcestruzzo, la posizione dell'asse neutro è determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave. Il valore del momento resistente  $M_{Rd}$  è determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione come se fosse tutta di calcestruzzo e parallelo all'asse neutro.

E' essenziale non dimenticare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato deve superare quello associato al diagramma del momento resistente della trave rinforzata a flessione.

Poiché il rinforzo di CFRP viene applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo. In accordo alle Istruzioni delineate dal CNR poiché il momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo e prodotto dai carichi permanenti allo SLE è inferiore a quello di fessurazione (ved. Allegato O) lo stato deformativo iniziale viene trascurato.

### 5.3.2.3 *Calcolo del momento resistente di progetto della sezione di mezzeria rinforzata*

In primis bisogna individuare la modalità di rottura della trave rinforzata, lato rinforzo o lato calcestruzzo. A tal scopo si valuta la percentuale meccanica del rinforzo in CFRP  $\mu_f$  definita dalla seguente equazione:

$$\mu_f = \frac{b_f \cdot (n_f \cdot t_{f,1}) \cdot f_{fdd,2}}{f_{cd} \cdot b \cdot d}$$

Dove:

- $b_f$  è la larghezza della lastra pultrusa CarboDur S626, pari a 60 mm;
- $b$  è l'interasse tra due lastre affiancate di rinforzo, pari a 200 mm;
- $d$  è l'altezza utile della sezione, cioè la distanza dell'armatura tesa dall'estradosso della trave; il valore di  $d$  è pari a 1426 mm;
- $f_{cd}$  segnato è pari all'85 % di  $f_{cd}$ , per tenere conto dell'effetto dei carichi di lunga durata;  $f_{cd}$  è il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente ed è uguale a 22.2 MPa;
- $t_{f,1}$  è lo spessore della lastra CarboDur S626 e risulta pari a 2.6 mm;
- $n_f$  è il numero degli strati di lastra pultrusa CFRP ed è pari a 1;
- $f_{fdd,2}$  è la massima tensione alla quale il composito può lavorare senza che si verifichi il distacco intermedio ed è ricavata dal prodotto tra la massima deformazione a trazione del rinforzo  $\epsilon_{fd}$  ed il suo modulo elastico  $E_f$ ; il valore di  $f_{fdd,2}$  risulta pari a 2163.64 MPa.

Si ottiene, infine, una percentuale meccanica del rinforzo in CFRP pari a 6.3%.

Essa va confrontata con la percentuale meccanica limite  $\mu_{f1-2}$  corrispondente al contemporaneo raggiungimento della  $\epsilon_{fd}$  e della massima deformazione a compressione del calcestruzzo  $\epsilon_{cu}$ . Il valore di  $\mu_{f1-2}$  è determinato mediante la seguente espressione:

$$\mu_{f1-2} = \frac{0.8 \cdot \epsilon_{cu} \cdot \frac{h}{d}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fd} + \epsilon_0} - \mu_s \cdot (1 - u)$$

Dove:

- $\epsilon_0$  è la deformazione del calcestruzzo al lembo teso al momento dell'applicazione del rinforzo ed è pari a zero dal momento che lo stato deformativo iniziale viene trascurato;
- $h$  è l'altezza della sezione pari a 1500 mm;
- $\mu_s$  è la percentuale meccanica di armatura tesa ed è pari a 26.5 %;
- $u$  è il rapporto tra l'area dell'armatura compressa e quella dell'armatura tesa ed il suo valore è pari a 2.26.

Così si ottiene una percentuale meccanica limite  $\mu_{f1-2}$  pari a 67.9 %.

In accordo alle Istruzioni delineate dal CNR, essendo  $\mu_f$  minore di  $\mu_{f1-2}$ , la rottura avviene lato rinforzo. Un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione del composito  $\epsilon_{fd}$ .

Nota la modalità di rottura si individua la posizione dell'asse neutro dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave. Considerando che la trave rinforzata è soggetta ad uno sforzo flettente, la risultante degli sforzi normali (di trazione e compressione) agenti nelle componenti della sezione rinforzata deve essere uguale a zero, come mostra la seguente equazione.

$$0 = S_{CFRP} + S_p + S + S' + C$$

Dove  $S_{CFRP}$  è lo sforzo normale di trazione agente nelle 18 lastre pultruse CFRP,  $S_p$  è lo sforzo normale di trazione agente nei 26 cavi di precompressione interna rimasti,  $S$  è lo sforzo normale di trazione agente nelle armature lente tese,  $S'$  è lo sforzo normale di compressione agente nelle armature lente compresse e  $C$  è lo sforzo normale di compressione agente nella porzione di calcestruzzo soggetta a compressione. Il valore del generico sforzo normale agente nella singola componente della sezione rinforzata è determinato dal prodotto tra la tensione  $\sigma$  agente nella singola componente e l'area  $A$  occupata da essa. Per conoscere la tensione agente nella singola componente è necessario conoscere il legame costitutivo di quest'ultima. Noto il legame costitutivo della singola componente ed il suo stato deformativo allo SLU è possibile conoscere la tensione agente in essa. In seguito vengono riassunti in modo tabellare i legami costitutivi degli acciai delle armature lente e dei cavi di precompressione, il legame costitutivo del calcestruzzo ed il legame costitutivo delle lastre pultruse CFRP.

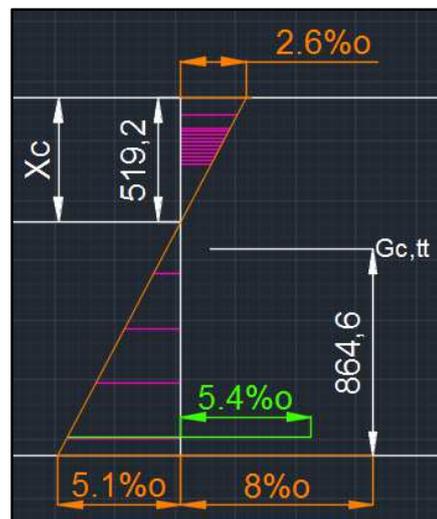
ELASTICO PERFETTAMENTE PLASTICO		
FeB44k	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
ELASTICO	1.9	373.91
PLASTICO	67.5	373.91

ELASTICO PERFETTAMENTE PLASTICO		
Trefolo 1800	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
ELASTICO	7.2	1408.70
PLASTICO	31.5	1408.70

PARABOLA - RETTANGOLO		
Classe C40	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
ELASTICO	2	18.87
PLASTICO	3.5	18.87

ELASTICO LINEARE FINO A ROTTURA		
CFRP	$\epsilon_{rd}$ [%]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
ELASTICO	13.1	2163.64

Lo stato di deformazione allo SLU della sezione di mezzeria rinforzata viene definito per iterazione fino alla convergenza della risultante degli sforzi normali agenti nelle componenti della sezione rinforzata al valore zero. Dunque, noto lo stato deformativo allo SLU, si conosce la posizione dell'asse neutro a 519.2 mm dall'estradosso della trave ( $x_c$ ). Con riferimento alla normativa vigente in assenza di un calcolo diretto della capacità di rotazione plastica, si ammette che la sezione sia sufficientemente duttile quando  $x_c/d$  sia minore o uguale a 0.45 per calcestruzzi fino alla classe C50/60. Nel caso in esame tale rapporto vale 0.36.



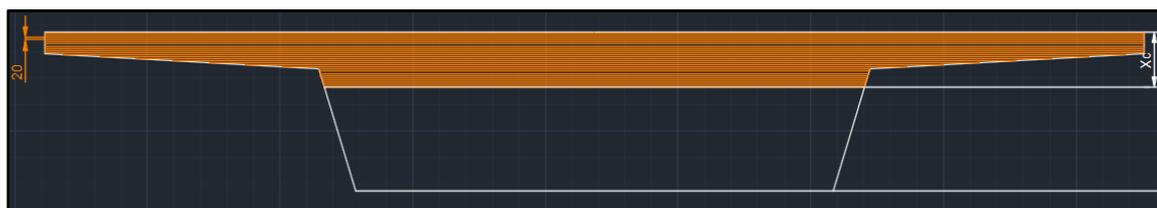
**Figura 5.3.3 : Stato di deformazione allo SLU della sezione di mezzeria rinforzata**

Sia i cavi di precompressione interna che le lastre pultruse CFRP di precompressione esterna presentano deformazioni iniziali pari rispettivamente a 5.4 ‰ e 8.0 ‰. In quanto a ciò, la loro deformazione è pari alla somma algebrica della deformazione del calcestruzzo ad essi adeso più la loro deformazione iniziale. Nella seguente

Tabella sono riportati i valori della deformazione del calcestruzzo a livello delle lastre pultruse CFRP, a livello dei cavi di precompressione interna ed a livello delle armature lente. A fianco ad essi vengono riportati i valori delle tensioni agenti, delle aree corrispondenti e degli sforzi normali agenti.

	$E_c$ - ‰	$\sigma$ - N/mm <sup>2</sup>	A - mm <sup>2</sup>	Sforzo normale - N	
CFRP	5.1	2163.64	2808	6075490.91	$S_{CFRP}$
1	4.7	373.91	3820	1428336.20	
P	4.7	1408.70	43274.4	60960459.13	$S_P$
2	3.5	373.91	402	150311.82	
3	2.3	373.91	402	150311.82	
4	1.1	220.59	402	88678.90	$S_{1-4}$
5	0.1	13.43	402	-5398.56	
6	1.3	247.45	402	-99476.02	
7	1.3	262.72	402	-105611.51	
8	1.4	277.98	402	-111747.00	
9	1.5	293.24	402	-117882.48	
10	1.6	308.50	402	-124017.97	
11	1.6	323.76	402	-130153.46	
12	1.7	339.03	402	-136288.94	
13	1.8	354.29	402	-142424.43	
14	1.9	369.55	402	-148559.92	
15	2.0	373.91	402	-150311.82	
16	2.0	373.91	402	-150311.82	
17	2.3	373.91	8646	-3232825.86	$S'_{5-17}$

Per quanto riguarda il calcolo di C, sforzo normale di compressione agente nella porzione di calcestruzzo soggetta a compressione, si è suddivisa la porzione compressa della sezione di mezzeria in aree infinitesime di altezza pari a 20 mm.



**Figura 5.3.4 : Suddivisione dell'area di calcestruzzo reagente in aree infinitesime**

In seguito vengono riportati in forma tabellare i valori della deformazione del calcestruzzo a livello dei baricentri delle aree infinitesime. A fianco ad essi vengono riportati i valori delle tensioni agenti, delle aree infinitesime, degli sforzi normali agenti infinitesimi e dei loro bracci rispetto all'estradosso della trave.

CONCRETE	$\epsilon_{c,i} - \text{‰}$	$\sigma_{c,i} - \text{N/mm}^2$	$A_i - \text{mm}^2$	$C_i - \text{N}$	$y_i - \text{mm}$
1	2.6	18.87	207000.00	-3906090.00	10
2	2.5	18.87	207000.00	-3906090.00	30
3	2.4	18.87	207000.00	-3906090.00	50
4	2.3	18.87	207000.00	-3906090.00	70
5	2.2	18.87	207000.00	-3906090.00	90
6	2.1	18.87	207000.00	-3906090.00	110
7	2.0	18.87	207000.00	-3906090.00	130
8	1.9	18.83	207000.00	-3897981.58	150
9	1.8	18.69	207000.00	-3869136.75	170
10	1.7	18.45	207000.00	-3819408.17	190
1	1.6	18.11	200133.33	-3624439.63	210
2	1.5	17.67	186400.00	-3293336.56	230
3	1.4	17.13	172666.67	-2956954.08	250
4	1.3	16.48	158933.33	-2619448.77	270
5	1.2	15.74	145200.00	-2284977.22	290
6	1.1	14.89	131466.67	-1957695.98	310
7	1.0	13.94	117733.33	-1641761.64	330
1	0.9	12.90	104000.00	-1341330.77	350
2	0.8	11.75	103756.52	-1219054.78	370
3	0.7	10.50	103513.04	-1086894.72	390
4	0.6	9.15	103269.57	-944924.30	410
5	0.5	7.70	103026.09	-793217.20	430
6	0.4	6.15	102782.61	-631847.12	450
7	0.3	4.49	102539.13	-460887.74	470
8	0.2	2.74	102295.65	-280412.76	490
9	0.0	0.89	102052.17	-90495.87	510

C

Per conoscere il punto di applicazione della risultante C si applica il teorema di Varignon.

$$y_C = \frac{\sum C_i * y_i}{C}$$

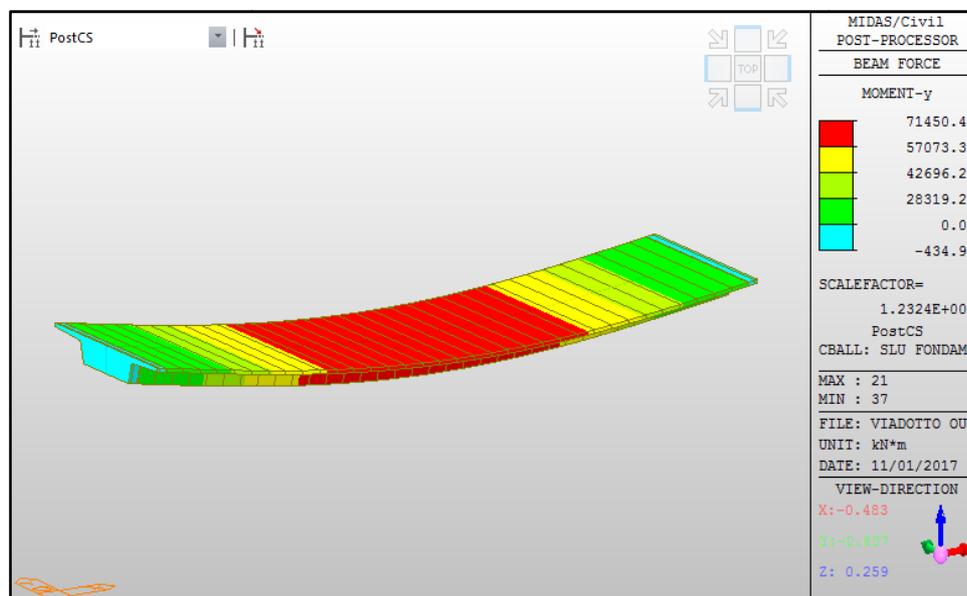
Dove  $y_C$  è il braccio della risultante C dall'estradosso della trave, ottenendo un valore pari a 178.1 mm.

Il valore del momento resistente  $M_{Rd}$  associato al predetto stato deformativo allo SLU è determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro della sezione come se fosse tutta di calcestruzzo e parallelo all'asse neutro. Noti gli sforzi normali agenti nelle componenti della sezione rinforzata ed il loro braccio rispetto al baricentro della sezione considerata tutta di calcestruzzo, è possibile conoscere il valore di  $M_{Rd}$  della sezione di mezzeria rinforzata mediante la seguente espressione.

$$M_{Rd} = b_{CFRP,G_{c,tt}} * S_{CFRP} + b_{P,G_{c,tt}} * S_P + b_{S,G_{c,tt}} * S + b_{S',G_{c,tt}} * |S'| + b_{C,G_{c,tt}} * |C|$$

Il valore di  $M_{Rd}$  calcolato è pari a 86176.40 kNm. Si fa notare che il valore di  $M_{Rd}$  calcolato al paragrafo 5.1.1 per la trave con i 28 cavi integri era risultato pari a 83077.0 kNm. Il valore di  $M_{Rd}$  calcolato per la trave rinforzata soddisfa la verifica allo SLU della sezione di mezzeria nella trave rinforzata, essendo maggiore del

momento sollecitante di progetto  $M_{Ed}$  nella sezione di mezzeria. Il valore di  $M_{Ed}$  è ottenuto dall'analisi strutturale del modello della trave nella situazione futura di restauro e nella combinazione di carico Fondamentale e risulta pari a 71450.40 kNm.



**Figura 5.3.5 : Momenti sollecitanti nelle sezioni della trave rinforzata nella combinazione di carico Fondamentale**

Nella condizione di restauro della trave da ponte il coefficiente di sicurezza CS pari a  $M_{Rd}/M_{Ed}$  risulta pari a 1.21 con un margine di sicurezza del 21%, maggiore del margine di sicurezza che contraddistingue la trave nella situazione di danneggiamento con la rottura dei due cavi di precompressione, come mostra la seguente Tabella.

	CS
26 cavi + CFRP	1.21
28 cavi	1.16
26 cavi	1.10

Il coefficiente di sicurezza CS nella situazione di restauro è anche maggiore di quello che contraddistingue la trave nella situazione originaria di progetto, grazie all'elevata resistenza a trazione delle lastre pultruse CFRP ed ai loro bracci di applicazione maggiori rispetto a quelli dei cavi di precompressione interna. Dunque l'intervento progettato per rinforzare la trave da ponte consente di incrementare il margine di sicurezza della trave nella situazione originaria di progetto, garantendo un maggiore livello di sicurezza in presenza di una possibile futura rottura di altri cavi di post-tensione.

## CAPITOLO 6:

### VALUTAZIONE ECONOMICA

Nell'ambito del lavoro svolto per la presente Tesi di Laurea ho eseguito anche una valutazione di massima del possibile costo degli interventi da effettuarsi per il recupero della precompressione persa tramite lastre in fibra di carbonio pretese ed aderenti all'intradosso della trave.

I prezzi di riferimento utilizzati per la stesura del computo metrico estimativo di massima e per la definizione delle varie lavorazioni di cui al presente capitolo sono stati interamente desunti dall'Elenco Prezzi ANAS 2016, costituente il riferimento corrente per la computazione di opere pubbliche stradali.

La stima di massima dell'importo complessivo dei lavori ed oneri relativi al ripristino di una sola campata tipo del viadotto ammonta a € 116006.43 esclusa IVA per lavori oltre agli oneri per la sicurezza non soggetti a ribasso d'asta che sono stati stimati in € 11600.64 esclusa IVA, per un totale di € 127607.07 esclusa IVA.

In particolare sono stati individuati i seguenti corpi d'opera, costituiti da categorie omogenee di lavori da eseguire, secondo quanto indicato nella tabella seguente.

N.	Corpi d'Opera	Euro	%
1	DEMOLIZIONE ED ASPORTAZIONE DEL CALCESTRUZZO AMMALORATO	8288.04	7
2	PASSIVAZIONE DELLE ARMATURE ED INTERVENTI DI RIPRISTINO DEL COPRIFERRO	24943.45	22
3	INTERVENTI DI RINFORZO CON LASTRE PULTRUSE CFRP PRETESE	75536.44	65
4	INTERVENTI DI PROTEZIONE DEI SISTEMI DI RINFORZO	7238.50	6
	<b>Sommano lavori esclusi oneri della sicurezza</b>	116006.43	100
	ONERI DELLA SICUREZZA	11600.64	
	<b>Sommano lavori compresi oneri della sicurezza</b>	127607.07	

Si rimanda all'ALLEGATO P per il computo metrico estimativo di dettaglio dei lavori di cui sopra.

In particolare l'idrosabbatura non è resa necessaria dal momento che la preparazione della superficie è effettuata mediante idroscarifica. Diviene necessaria qualora trascorresse un elevato intervallo di tempo da tale operazione, a causa di particolari esigenze organizzative di cantiere, prima del trattamento dei ferri d'armatura. Dopo la rimozione della ruggine, i ferri d'armatura sono trattati mediante l'applicazione a pennello di doppia mano di malta cementizia anticorrosiva monocomponente.

## CONCLUSIONI

In base ai risultati ottenuti dalle verifiche strutturali, l'innovativo intervento di ripristino proposto mediante lastre di fibre di carbonio presollecitate, installate all'intradosso della trave ammalorata della campata 4 dell'impalcato sud, permette di riportare la struttura a condizioni di sicurezza in esercizio migliori rispetto a quelle originarie di progetto.

Infatti, dall'analisi strutturale del modello agli elementi finiti della trave nella sua configurazione originaria di progetto (con 28 cavi) e nella combinazione di carico Quasi Permanente allo Stato Limite di Esercizio si calcolano tensioni di compressione a tempo infinito all'intradosso della trave pari a 0.47 MPa. Nella situazione di danneggiamento della trave, con la perdita integrale di due dei ventotto cavi di post-tensione, queste tensioni di compressione diminuiscono passando a diventare tensioni di trazione fino a raggiungere il valore calcolato di 0.53 MPa. Tale valore, come si è detto, risulta comunque inferiore a quello della tensione di trazione media del calcestruzzo ammessa per normativa  $f_{ctm}$  pari a 3.1 MPa. Analizzando le tensioni in esercizio calcolate nella sezione di mezzeria a tempo infinito e nella combinazione di carico Quasi Permanente, dopo aver rinforzato la trave, queste tensioni di trazione si riducono passando a diventare nuovamente tensioni di compressione fino a raggiungere il valore di 0.81 MPa, producendo un miglioramento dello stato tensionale della trave rispetto alla situazione originaria di progetto in presenza dei 28 cavi di precompressione.

Inoltre, in base ai risultati ottenuti dalle verifiche strutturali, l'innovativo intervento di ripristino proposto, in cui le lastre pultruse CFRP sono aderenti all'intradosso della trave tramite l'incollaggio con resina epossidica, permette di riportare la struttura a condizioni di sicurezza nei riguardi del collasso della trave a Stato Limite Ultimo migliori rispetto a quelle originarie di progetto. Peraltro è soddisfatta la verifica di resistenza allo Stato Limite Ultimo della sezione di mezzeria della trave in assenza di due cavi di precompressione, in quanto si è calcolata una resistenza ultima superiore alle azioni di sollecitazione attese.

Infatti, si è calcolato il valore del momento resistente della sezione di mezzeria della trave nella sua configurazione originaria di progetto (con 28 cavi) pari a 83077 kNm. Nella situazione di danneggiamento della trave, con la perdita integrale di due dei ventotto cavi di post-tensione, questa resistenza ultima diminuisce fino a raggiungere il valore calcolato di 78389 kNm. Tale valore, come si è detto, risulta comunque superiore a quello generato dalle sollecitazioni agenti nella combinazione di carico Fondamentale pari a 71484.73 kNm. Analizzando allo Stato Limite Ultimo la sezione di mezzeria, dopo aver rinforzato la trave, questa resistenza ultima cresce fino a raggiungere il valore di 86176.40 kNm, incrementando il margine di sicurezza, nei riguardi del collasso, che caratterizzava la trave nella situazione originaria di progetto.

L'innovativo intervento di rinforzo proposto risulta decisamente poco invasivo sulla struttura da rinforzare, con riduzione dei tempi ed oneri di intervento e della relativa influenza sulle cantierizzazioni del traffico autostradale. In particolare, l'intervento di ripristino della precompressione con fibre di carbonio pretese proposto in questa Tesi di Laurea potrà essere eseguito nella sua totalità operando all'intradosso dell'opera d'arte e senza interferenze con il traffico autostradale e con agevole accesso alle zone di lavorazione. Quanto proposto non precluderà peraltro futuri eventuali interventi di ripristino strutturale che si dovessero rendere necessari nella vita utile dell'opera.

L'innovativo intervento di rinforzo proposto presenta poi un costo, che può essere stimato in via preliminare e nell'ambito della presente Tesi di Laurea, in circa 130000 € esclusa IVA, compresi oneri della sicurezza, per una sola campata tipo ammalorata dell'impalcato.

Allegato A – Traffic Line Lanes

The image shows three instances of the 'Traffic Line Lanes' dialog box, each for a different lane: 'asse lc1', 'asse lc2', and 'asse lc 3 rim'. Each dialog contains the following sections:

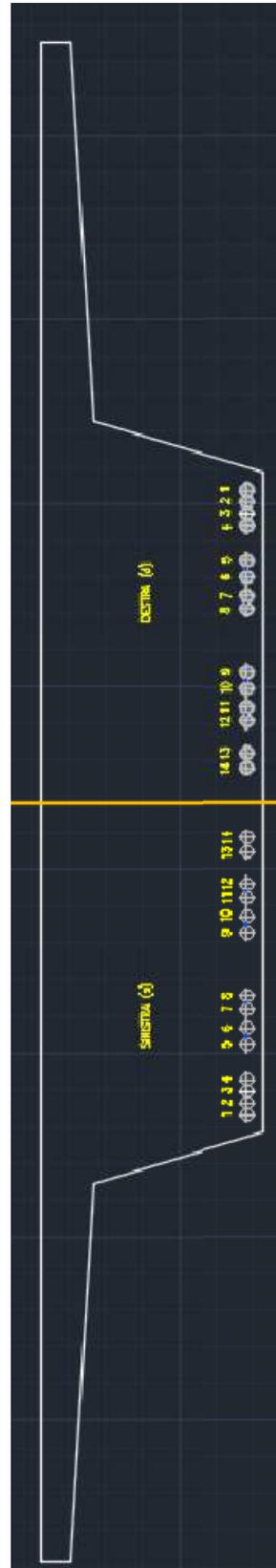
- Traffic Lane Properties:** Includes a diagram showing lane geometry with 'Start', 'End', and 'a : Eccentricity' labels. Below the diagram are input fields for Lane Width, Eccentricity, and Wheel Spacing.
- Eccentricity of Vertical Loads to Consider Cant:** A field for setting the cant value.
- Traffic Lane Optimization:** A checkbox to enable optimization.
- Vehicular Load Distribution:** Radio buttons for 'Lane Element' (selected) and 'Cross Beam', and a 'Cross Beam Group' dropdown.
- Skew:** Input fields for 'Start' and 'End' in degrees.
- Moving Direction:** Radio buttons for 'Forward', 'Backward', and 'Both' (selected).
- Selection by:** Radio buttons for '2 Points' (selected), 'Picking', and 'Number', with corresponding coordinate input fields.
- Operations:** 'Add', 'Insert', and 'Delete' buttons.
- Table:** A table with columns 'No', 'Elem', 'Eccen. (mm)', and 'Eccen.Vert. Loads (mm)'. Below the table are 'OK', 'Cancel', and 'Apply' buttons.

Key differences between the three dialog boxes are:

- asse lc1:** Lane Width: 3000 mm, Eccentricity: 0 mm, Wheel Spacing: 2000 mm. Table shows Eccen. (mm) as -2875.
- asse lc2:** Lane Width: 3000 mm, Eccentricity: 0 mm, Wheel Spacing: 2000 mm. Table shows Eccen. (mm) as 125.
- asse lc 3 rim:** Lane Width: 2750 mm, Eccentricity: 0 mm, Wheel Spacing: 2000 mm. Table shows Eccen. (mm) as 3000.

# Allegato B - I tracciati dei 28 cavi di precompressione

## Sezione trasversale di mezzeria



prog [m]	Y14 s	Z14 s	fix	Ry	Rz
0	0.29	0	0	0	0
0.15	0.29	0	0	0	0
0.5	0.29	0	0	0	0
0.55	0.29	0.4403827	0	0	0
1.5	0.29	0.3073827	0	0	0
2.5	0.29	0.1743827	0	0	0
3.5	0.29	0.0513827	0	0	0
4.5	0.29	-0.0636173	0	0	0
5.5	0.29	-0.1706173	0	0	0
6.5	0.29	-0.2686173	0	0	0
7.5	0.29	-0.3586173	0	0	0
8.5	0.29	-0.4396173	0	0	0
9.5	0.29	-0.5116173	0	0	0
10.5	0.29	-0.5756173	0	0	0
11.5	0.29	-0.6316173	0	0	0
12.5	0.29	-0.6776173	0	0	0
13.5	0.29	-0.7166173	0	0	0
14.5	0.29	-0.7466173	0	0	0
15.5	0.29	-0.7676173	0	0	0
16.5	0.29	-0.7806173	0	0	0
17.5	0.29	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.29	-0.7806173	0	0	0
19.5	0.29	-0.7676173	0	0	0
20.5	0.29	-0.7466173	0	0	0
21.5	0.29	-0.7166173	0	0	0
22.5	0.29	-0.6776173	0	0	0
23.5	0.29	-0.6316173	0	0	0
24.5	0.29	-0.5756173	0	0	0
25.5	0.29	-0.5116173	0	0	0
26.5	0.29	-0.4396173	0	0	0
27.5	0.29	-0.3586173	0	0	0
28.5	0.29	-0.2686173	0	0	0
29.5	0.29	-0.1706173	0	0	0
30.5	0.29	-0.0636173	0	0	0
31.5	0.29	0.0513827	0	0	0
32.5	0.29	0.1743827	0	0	0
33.5	0.29	0.3073827	0	0	0
34.45	0.29	0.4403827	0	0	0
34.5	0.29	0	0	0	0
34.85	0.29	0	0	0	0
35	0.29	0	0	0	0

prog [m]	Y13 s	Z13 s	fix	Ry	Rz
0	0.29	0	0	0	0
0.15	0.29	-0.3646173	0	0	0
0.5	0.29	-0.3816173	0	0	0
0.55	0.29	-0.3839173	0	0	0
1.5	0.29	-0.4276173	0	0	0
2.5	0.29	-0.4706173	0	0	0
3.5	0.29	-0.5116173	0	0	0
4.5	0.29	-0.5486173	0	0	0
5.5	0.29	-0.5836173	0	0	0
6.5	0.29	-0.6156173	0	0	0
7.5	0.29	-0.6446173	0	0	0
8.5	0.29	-0.6716173	0	0	0
9.5	0.29	-0.6956173	0	0	0
10.5	0.29	-0.7166173	0	0	0
11.5	0.29	-0.7266173	0	0	0
12.5	0.29	-0.7496173	0	0	0
13.5	0.29	-0.7626173	0	0	0
14.5	0.29	-0.7716173	0	0	0
15.5	0.29	-0.7786173	0	0	0
16.5	0.29	-0.7836173	0	0	0
17.5	0.29	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.29	-0.7836173	0	0	0
19.5	0.29	-0.7786173	0	0	0
20.5	0.29	-0.7716173	0	0	0
21.5	0.29	-0.7626173	0	0	0
22.5	0.29	-0.7496173	0	0	0
23.5	0.29	-0.7266173	0	0	0
24.5	0.29	-0.7166173	0	0	0
25.5	0.29	-0.6956173	0	0	0
26.5	0.29	-0.6716173	0	0	0
27.5	0.29	-0.6446173	0	0	0
28.5	0.29	-0.6156173	0	0	0
29.5	0.29	-0.5836173	0	0	0
30.5	0.29	-0.5486173	0	0	0
31.5	0.29	-0.5116173	0	0	0
32.5	0.29	-0.4706173	0	0	0
33.5	0.29	-0.4276173	0	0	0
34.45	0.29	-0.3839173	0	0	0
34.5	0.29	-0.3816173	0	0	0
34.85	0.29	-0.3646173	0	0	0
35	0.29	0	0	0	0

prog [m]	Y14 d	Z14 d	fix	Ry	Rz
0	-0.29	0	0	0	0
0.15	-0.29	0	0	0	0
0.5	-0.29	0	0	0	0
0.55	-0.29	0.4403827	0	0	0
1.5	-0.29	0.3073827	0	0	0
2.5	-0.29	0.1743827	0	0	0
3.5	-0.29	0.0513827	0	0	0
4.5	-0.29	-0.0636173	0	0	0
5.5	-0.29	-0.1706173	0	0	0
6.5	-0.29	-0.2686173	0	0	0
7.5	-0.29	-0.3586173	0	0	0
8.5	-0.29	-0.4396173	0	0	0
9.5	-0.29	-0.5116173	0	0	0
10.5	-0.29	-0.5756173	0	0	0
11.5	-0.29	-0.6316173	0	0	0
12.5	-0.29	-0.6776173	0	0	0
13.5	-0.29	-0.7166173	0	0	0
14.5	-0.29	-0.7466173	0	0	0
15.5	-0.29	-0.7676173	0	0	0
16.5	-0.29	-0.7806173	0	0	0
17.5	-0.29	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.29	-0.7806173	0	0	0
19.5	-0.29	-0.7676173	0	0	0
20.5	-0.29	-0.7466173	0	0	0
21.5	-0.29	-0.7166173	0	0	0
22.5	-0.29	-0.6776173	0	0	0
23.5	-0.29	-0.6316173	0	0	0
24.5	-0.29	-0.5756173	0	0	0
25.5	-0.29	-0.5116173	0	0	0
26.5	-0.29	-0.4396173	0	0	0
27.5	-0.29	-0.3586173	0	0	0
28.5	-0.29	-0.2686173	0	0	0
29.5	-0.29	-0.1706173	0	0	0
30.5	-0.29	-0.0636173	0	0	0
31.5	-0.29	0.0513827	0	0	0
32.5	-0.29	0.1743827	0	0	0
33.5	-0.29	0.3073827	0	0	0
34.45	-0.29	0.4403827	0	0	0
34.5	-0.29	0	0	0	0
34.85	-0.29	0	0	0	0
35	-0.29	0	0	0	0

prog [m]	Y13 d	Z13 d	fix	Ry	Rz
0	-0.29	0	0	0	0
0.15	-0.29	-0.3646173	0	0	0
0.5	-0.29	-0.3816173	0	0	0
0.55	-0.29	-0.3839173	0	0	0
1.5	-0.29	-0.4276173	0	0	0
2.5	-0.29	-0.4706173	0	0	0
3.5	-0.29	-0.5116173	0	0	0
4.5	-0.29	-0.5486173	0	0	0
5.5	-0.29	-0.5836173	0	0	0
6.5	-0.29	-0.6156173	0	0	0
7.5	-0.29	-0.6446173	0	0	0
8.5	-0.29	-0.6716173	0	0	0
9.5	-0.29	-0.6956173	0	0	0
10.5	-0.29	-0.7166173	0	0	0
11.5	-0.29	-0.7266173	0	0	0
12.5	-0.29	-0.7496173	0	0	0
13.5	-0.29	-0.7626173	0	0	0
14.5	-0.29	-0.7716173	0	0	0
15.5	-0.29	-0.7786173	0	0	0
16.5	-0.29	-0.7836173	0	0	0
17.5	-0.29	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.29	-0.7836173	0	0	0
19.5	-0.29	-0.7786173	0	0	0
20.5	-0.29	-0.7716173	0	0	0
21.5	-0.29	-0.7626173	0	0	0
22.5	-0.29	-0.7496173	0	0	0
23.5	-0.29	-0.7266173	0	0	0
24.5	-0.29	-0.7166173	0	0	0
25.5	-0.29	-0.6956173	0	0	0
26.5	-0.29	-0.6716173	0	0	0
27.5	-0.29	-0.6446173	0	0	0
28.5	-0.29	-0.6156173	0	0	0
29.5	-0.29	-0.5836173	0	0	0
30.5	-0.29	-0.5486173	0	0	0
31.5	-0.29	-0.5116173	0	0	0
32.5	-0.29	-0.4706173	0	0	0
33.5	-0.29	-0.4276173	0	0	0
34.45	-0.29	-0.3839173	0	0	0
34.5	-0.29	-0.3816173	0	0	0
34.85	-0.29	-0.3646173	0	0	0
35	-0.29	0	0	0	0

prog [m]	Y12 s	Z12 s	fix	Ry	Rz
0	0.605	0	0	0	0
0.15	0.605	0	0	0	0
0.5	0.605	0	0	0	0
0.55	0.605	0.4403827	0	0	0
1.5	0.605	0.3073827	0	0	0
2.5	0.605	0.1743827	0	0	0
3.5	0.605	0.0513827	0	0	0
4.5	0.605	-0.0636173	0	0	0
5.5	0.605	-0.1706173	0	0	0
6.5	0.605	-0.2686173	0	0	0
7.5	0.605	-0.3586173	0	0	0
8.5	0.605	-0.4396173	0	0	0
9.5	0.605	-0.5116173	0	0	0
10.5	0.605	-0.5756173	0	0	0
11.5	0.605	-0.6316173	0	0	0
12.5	0.605	-0.6776173	0	0	0
13.5	0.605	-0.7166173	0	0	0
14.5	0.605	-0.7466173	0	0	0
15.5	0.605	-0.7676173	0	0	0
16.5	0.605	-0.7806173	0	0	0
17.5	0.605	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.605	-0.7806173	0	0	0
19.5	0.605	-0.7676173	0	0	0
20.5	0.605	-0.7466173	0	0	0
21.5	0.605	-0.7166173	0	0	0
22.5	0.605	-0.6776173	0	0	0
23.5	0.605	-0.6316173	0	0	0
24.5	0.605	-0.5756173	0	0	0
25.5	0.605	-0.5116173	0	0	0
26.5	0.605	-0.4396173	0	0	0
27.5	0.605	-0.3586173	0	0	0
28.5	0.605	-0.2686173	0	0	0
29.5	0.605	-0.1706173	0	0	0
30.5	0.605	-0.0636173	0	0	0
31.5	0.605	0.0513827	0	0	0
32.5	0.605	0.1743827	0	0	0
33.5	0.605	0.3073827	0	0	0
34.45	0.605	0.4403827	0	0	0
34.5	0.605	0	0	0	0
34.85	0.605	0	0	0	0
35	0.605	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.605	0	0	0	0
0.15	0.605	-0.3646173	0	0	0
0.5	0.605	-0.3816173	0	0	0
0.55	0.605	-0.3839173	0	0	0
1.5	0.605	-0.4276173	0	0	0
2.5	0.605	-0.4706173	0	0	0
3.5	0.605	-0.5116173	0	0	0
4.5	0.605	-0.5486173	0	0	0
5.5	0.605	-0.5836173	0	0	0
6.5	0.605	-0.6156173	0	0	0
7.5	0.605	-0.6446173	0	0	0
8.5	0.605	-0.6716173	0	0	0
9.5	0.605	-0.6956173	0	0	0
10.5	0.605	-0.7166173	0	0	0
11.5	0.605	-0.7266173	0	0	0
12.5	0.605	-0.7496173	0	0	0
13.5	0.605	-0.7626173	0	0	0
14.5	0.605	-0.7716173	0	0	0
15.5	0.605	-0.7786173	0	0	0
16.5	0.605	-0.7836173	0	0	0
17.5	0.605	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.605	-0.7836173	0	0	0
19.5	0.605	-0.7786173	0	0	0
20.5	0.605	-0.7716173	0	0	0
21.5	0.605	-0.7626173	0	0	0
22.5	0.605	-0.7496173	0	0	0
23.5	0.605	-0.7266173	0	0	0
24.5	0.605	-0.7166173	0	0	0
25.5	0.605	-0.6956173	0	0	0
26.5	0.605	-0.6716173	0	0	0
27.5	0.605	-0.6446173	0	0	0
28.5	0.605	-0.6156173	0	0	0
29.5	0.605	-0.5836173	0	0	0
30.5	0.605	-0.5486173	0	0	0
31.5	0.605	-0.5116173	0	0	0
32.5	0.605	-0.4706173	0	0	0
33.5	0.605	-0.4276173	0	0	0
34.45	0.605	-0.3839173	0	0	0
34.5	0.605	-0.3816173	0	0	0
34.85	0.605	-0.3646173	0	0	0
35	0.605	0	0	0	0

prog [m]	Y12 d	Z12 d	fix	Ry	Rz
0	-0.605	0	0	0	0
0.15	-0.605	0	0	0	0
0.5	-0.605	0	0	0	0
0.55	-0.605	0.4403827	0	0	0
1.5	-0.605	0.3073827	0	0	0
2.5	-0.605	0.1743827	0	0	0
3.5	-0.605	0.0513827	0	0	0
4.5	-0.605	-0.0636173	0	0	0
5.5	-0.605	-0.1706173	0	0	0
6.5	-0.605	-0.2686173	0	0	0
7.5	-0.605	-0.3586173	0	0	0
8.5	-0.605	-0.4396173	0	0	0
9.5	-0.605	-0.5116173	0	0	0
10.5	-0.605	-0.5756173	0	0	0
11.5	-0.605	-0.6316173	0	0	0
12.5	-0.605	-0.6776173	0	0	0
13.5	-0.605	-0.7166173	0	0	0
14.5	-0.605	-0.7466173	0	0	0
15.5	-0.605	-0.7676173	0	0	0
16.5	-0.605	-0.7806173	0	0	0
17.5	-0.605	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.605	-0.7806173	0	0	0
19.5	-0.605	-0.7676173	0	0	0
20.5	-0.605	-0.7466173	0	0	0
21.5	-0.605	-0.7166173	0	0	0
22.5	-0.605	-0.6776173	0	0	0
23.5	-0.605	-0.6316173	0	0	0
24.5	-0.605	-0.5756173	0	0	0
25.5	-0.605	-0.5116173	0	0	0
26.5	-0.605	-0.4396173	0	0	0
27.5	-0.605	-0.3586173	0	0	0
28.5	-0.605	-0.2686173	0	0	0
29.5	-0.605	-0.1706173	0	0	0
30.5	-0.605	-0.0636173	0	0	0
31.5	-0.605	0.0513827	0	0	0
32.5	-0.605	0.1743827	0	0	0
33.5	-0.605	0.3073827	0	0	0
34.45	-0.605	0.4403827	0	0	0
34.5	-0.605	0	0	0	0
34.85	-0.605	0	0	0	0
35	-0.605	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.605	0	0	0	0
0.15	-0.605	-0.3646173	0	0	0
0.5	-0.605	-0.3816173	0	0	0
0.55	-0.605	-0.3839173	0	0	0
1.5	-0.605	-0.4276173	0	0	0
2.5	-0.605	-0.4706173	0	0	0
3.5	-0.605	-0.5116173	0	0	0
4.5	-0.605	-0.5486173	0	0	0
5.5	-0.605	-0.5836173	0	0	0
6.5	-0.605	-0.6156173	0	0	0
7.5	-0.605	-0.6446173	0	0	0
8.5	-0.605	-0.6716173	0	0	0
9.5	-0.605	-0.6956173	0	0	0
10.5	-0.605	-0.7166173	0	0	0
11.5	-0.605	-0.7266173	0	0	0
12.5	-0.605	-0.7496173	0	0	0
13.5	-0.605	-0.7626173	0	0	0
14.5	-0.605	-0.7716173	0	0	0
15.5	-0.605	-0.7786173	0	0	0
16.5	-0.605	-0.7836173	0	0	0
17.5	-0.605	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.605	-0.7836173	0	0	0
19.5	-0.605	-0.7786173	0	0	0
20.5	-0.605	-0.7716173	0	0	0
21.5	-0.605	-0.7626173	0	0	0
22.5	-0.605	-0.7496173	0	0	0
23.5	-0.605	-0.7266173	0	0	0
24.5	-0.605	-0.7166173	0	0	0
25.5	-0.605	-0.6956173	0	0	0
26.5	-0.605	-0.6716173	0	0	0
27.5	-0.605	-0.6446173	0	0	0
28.5	-0.605	-0.6156173	0	0	0
29.5	-0.605	-0.5836173	0	0	0
30.5	-0.605	-0.5486173	0	0	0
31.5	-0.605	-0.5116173	0	0	0
32.5	-0.605	-0.4706173	0	0	0
33.5	-0.605	-0.4276173	0	0	0
34.45	-0.605	-0.3839173	0	0	0
34.5	-0.605	-0.3816173	0	0	0
34.85	-0.605	-0.3646173	0	0	0
35	-0.605	0	0	0	0

prog [m]	Y10 s	Z10 s	fix	Ry	Rz
0	0.835	0	0	0	0
0.15	0.835	0	0	0	0
0.5	0.835	0	0	0	0
0.55	0.835	0.4403827	0	0	0
1.5	0.835	0.3073827	0	0	0
2.5	0.835	0.1743827	0	0	0
3.5	0.835	0.0513827	0	0	0
4.5	0.835	-0.0636173	0	0	0
5.5	0.835	-0.1706173	0	0	0
6.5	0.835	-0.2686173	0	0	0
7.5	0.835	-0.3586173	0	0	0
8.5	0.835	-0.4396173	0	0	0
9.5	0.835	-0.5116173	0	0	0
10.5	0.835	-0.5756173	0	0	0
11.5	0.835	-0.6316173	0	0	0
12.5	0.835	-0.6776173	0	0	0
13.5	0.835	-0.7166173	0	0	0
14.5	0.835	-0.7466173	0	0	0
15.5	0.835	-0.7676173	0	0	0
16.5	0.835	-0.7806173	0	0	0
17.5	0.835	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.835	-0.7806173	0	0	0
19.5	0.835	-0.7676173	0	0	0
20.5	0.835	-0.7466173	0	0	0
21.5	0.835	-0.7166173	0	0	0
22.5	0.835	-0.6776173	0	0	0
23.5	0.835	-0.6316173	0	0	0
24.5	0.835	-0.5756173	0	0	0
25.5	0.835	-0.5116173	0	0	0
26.5	0.835	-0.4396173	0	0	0
27.5	0.835	-0.3586173	0	0	0
28.5	0.835	-0.2686173	0	0	0
29.5	0.835	-0.1706173	0	0	0
30.5	0.835	-0.0636173	0	0	0
31.5	0.835	0.0513827	0	0	0
32.5	0.835	0.1743827	0	0	0
33.5	0.835	0.3073827	0	0	0
34.45	0.835	0.4403827	0	0	0
34.5	0.835	0	0	0	0
34.85	0.835	0	0	0	0
35	0.835	0	0	0	0

prog [m]	Y9 s	Z9 s	fix	Ry	Rz
0	0.835	0	0	0	0
0.15	0.835	-0.3646173	0	0	0
0.5	0.835	-0.3816173	0	0	0
0.55	0.835	-0.3839173	0	0	0
1.5	0.835	-0.4276173	0	0	0
2.5	0.835	-0.4706173	0	0	0
3.5	0.835	-0.5116173	0	0	0
4.5	0.835	-0.5486173	0	0	0
5.5	0.835	-0.5836173	0	0	0
6.5	0.835	-0.6156173	0	0	0
7.5	0.835	-0.6446173	0	0	0
8.5	0.835	-0.6716173	0	0	0
9.5	0.835	-0.6956173	0	0	0
10.5	0.835	-0.7166173	0	0	0
11.5	0.835	-0.7266173	0	0	0
12.5	0.835	-0.7496173	0	0	0
13.5	0.835	-0.7626173	0	0	0
14.5	0.835	-0.7716173	0	0	0
15.5	0.835	-0.7786173	0	0	0
16.5	0.835	-0.7836173	0	0	0
17.5	0.835	-0.7846173	0	0	0
18.5	0.835	-0.7836173	0	0	0
19.5	0.835	-0.7786173	0	0	0
20.5	0.835	-0.7716173	0	0	0
21.5	0.835	-0.7626173	0	0	0
22.5	0.835	-0.7496173	0	0	0
23.5	0.835	-0.7266173	0	0	0
24.5	0.835	-0.7166173	0	0	0
25.5	0.835	-0.6956173	0	0	0
26.5	0.835	-0.6716173	0	0	0
27.5	0.835	-0.6446173	0	0	0
28.5	0.835	-0.6156173	0	0	0
29.5	0.835	-0.5836173	0	0	0
30.5	0.835	-0.5486173	0	0	0
31.5	0.835	-0.5116173	0	0	0
32.5	0.835	-0.4706173	0	0	0
33.5	0.835	-0.4276173	0	0	0
34.45	0.835	-0.3839173	0	0	0
34.5	0.835	-0.3816173	0	0	0
34.85	0.835	-0.3646173	0	0	0
35	0.835	0	0	0	0

prog [m]	Y10 d	Z10 d	fix	Ry	Rz
0	-0.835	0	0	0	0
0.15	-0.835	0	0	0	0
0.5	-0.835	0	0	0	0
0.55	-0.835	0.4403827	0	0	0
1.5	-0.835	0.3073827	0	0	0
2.5	-0.835	0.1743827	0	0	0
3.5	-0.835	0.0513827	0	0	0
4.5	-0.835	-0.0636173	0	0	0
5.5	-0.835	-0.1706173	0	0	0
6.5	-0.835	-0.2686173	0	0	0
7.5	-0.835	-0.3586173	0	0	0
8.5	-0.835	-0.4396173	0	0	0
9.5	-0.835	-0.5116173	0	0	0
10.5	-0.835	-0.5756173	0	0	0
11.5	-0.835	-0.6316173	0	0	0
12.5	-0.835	-0.6776173	0	0	0
13.5	-0.835	-0.7166173	0	0	0
14.5	-0.835	-0.7466173	0	0	0
15.5	-0.835	-0.7676173	0	0	0
16.5	-0.835	-0.7806173	0	0	0
17.5	-0.835	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.835	-0.7806173	0	0	0
19.5	-0.835	-0.7676173	0	0	0
20.5	-0.835	-0.7466173	0	0	0
21.5	-0.835	-0.7166173	0	0	0
22.5	-0.835	-0.6776173	0	0	0
23.5	-0.835	-0.6316173	0	0	0
24.5	-0.835	-0.5756173	0	0	0
25.5	-0.835	-0.5116173	0	0	0
26.5	-0.835	-0.4396173	0	0	0
27.5	-0.835	-0.3586173	0	0	0
28.5	-0.835	-0.2686173	0	0	0
29.5	-0.835	-0.1706173	0	0	0
30.5	-0.835	-0.0636173	0	0	0
31.5	-0.835	0.0513827	0	0	0
32.5	-0.835	0.1743827	0	0	0
33.5	-0.835	0.3073827	0	0	0
34.45	-0.835	0.4403827	0	0	0
34.5	-0.835	0	0	0	0
34.85	-0.835	0	0	0	0
35	-0.835	0	0	0	0

prog [m]	Y9 d	Z9 d	fix	Ry	Rz
0	-0.835	0	0	0	0
0.15	-0.835	-0.3646173	0	0	0
0.5	-0.835	-0.3816173	0	0	0
0.55	-0.835	-0.3839173	0	0	0
1.5	-0.835	-0.4276173	0	0	0
2.5	-0.835	-0.4706173	0	0	0
3.5	-0.835	-0.5116173	0	0	0
4.5	-0.835	-0.5486173	0	0	0
5.5	-0.835	-0.5836173	0	0	0
6.5	-0.835	-0.6156173	0	0	0
7.5	-0.835	-0.6446173	0	0	0
8.5	-0.835	-0.6716173	0	0	0
9.5	-0.835	-0.6956173	0	0	0
10.5	-0.835	-0.7166173	0	0	0
11.5	-0.835	-0.7266173	0	0	0
12.5	-0.835	-0.7496173	0	0	0
13.5	-0.835	-0.7626173	0	0	0
14.5	-0.835	-0.7716173	0	0	0
15.5	-0.835	-0.7786173	0	0	0
16.5	-0.835	-0.7836173	0	0	0
17.5	-0.835	-0.7846173	0	0	0
18.5	-0.835	-0.7836173	0	0	0
19.5	-0.835	-0.7786173	0	0	0
20.5	-0.835	-0.7716173	0	0	0
21.5	-0.835	-0.7626173	0	0	0
22.5	-0.835	-0.7496173	0	0	0
23.5	-0.835	-0.7266173	0	0	0
24.5	-0.835	-0.7166173	0	0	0
25.5	-0.835	-0.6956173	0	0	0
26.5	-0.835	-0.6716173	0	0	0
27.5	-0.835	-0.6446173	0	0	0
28.5	-0.835	-0.6156173	0	0	0
29.5	-0.835	-0.5836173	0	0	0
30.5	-0.835	-0.5486173	0	0	0
31.5	-0.835	-0.5116173	0	0	0
32.5	-0.835	-0.4706173	0	0	0
33.5	-0.835	-0.4276173	0	0	0
34.45	-0.835	-0.3839173	0	0	0
34.5	-0.835	-0.3816173	0	0	0
34.85	-0.835	-0.3646173	0	0	0
35	-0.835	0	0	0	0

prog [m]	Y8 s	Z8 s	fix	Ry	Rz
0	1.365	0	0	0	0
0.15	1.365	0	0	0	0
0.5	1.365	0	0	0	0
0.55	1.365	0.4403827	0	0	0
1.5	1.365	0.3073827	0	0	0
2.5	1.365	0.1743827	0	0	0
3.5	1.365	0.0513827	0	0	0
4.5	1.365	-0.0636173	0	0	0
5.5	1.365	-0.1706173	0	0	0
6.5	1.365	-0.2686173	0	0	0
7.5	1.365	-0.3586173	0	0	0
8.5	1.365	-0.4396173	0	0	0
9.5	1.365	-0.5116173	0	0	0
10.5	1.365	-0.5756173	0	0	0
11.5	1.365	-0.6316173	0	0	0
12.5	1.365	-0.6776173	0	0	0
13.5	1.365	-0.7166173	0	0	0
14.5	1.365	-0.7466173	0	0	0
15.5	1.365	-0.7676173	0	0	0
16.5	1.365	-0.7806173	0	0	0
17.5	1.365	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.365	-0.7806173	0	0	0
19.5	1.365	-0.7676173	0	0	0
20.5	1.365	-0.7466173	0	0	0
21.5	1.365	-0.7166173	0	0	0
22.5	1.365	-0.6776173	0	0	0
23.5	1.365	-0.6316173	0	0	0
24.5	1.365	-0.5756173	0	0	0
25.5	1.365	-0.5116173	0	0	0
26.5	1.365	-0.4396173	0	0	0
27.5	1.365	-0.3586173	0	0	0
28.5	1.365	-0.2686173	0	0	0
29.5	1.365	-0.1706173	0	0	0
30.5	1.365	-0.0636173	0	0	0
31.5	1.365	0.0513827	0	0	0
32.5	1.365	0.1743827	0	0	0
33.5	1.365	0.3073827	0	0	0
34.45	1.365	0.4403827	0	0	0
34.5	1.365	0	0	0	0
34.85	1.365	0	0	0	0
35	1.365	0	0	0	0

prog [m]	Y7 s	Z7 s	fix	Ry	Rz
0	1.365	0	0	0	0
0.15	1.365	-0.3646173	0	0	0
0.5	1.365	-0.3816173	0	0	0
0.55	1.365	-0.3839173	0	0	0
1.5	1.365	-0.4276173	0	0	0
2.5	1.365	-0.4706173	0	0	0
3.5	1.365	-0.5116173	0	0	0
4.5	1.365	-0.5486173	0	0	0
5.5	1.365	-0.5836173	0	0	0
6.5	1.365	-0.6156173	0	0	0
7.5	1.365	-0.6446173	0	0	0
8.5	1.365	-0.6716173	0	0	0
9.5	1.365	-0.6956173	0	0	0
10.5	1.365	-0.7166173	0	0	0
11.5	1.365	-0.7266173	0	0	0
12.5	1.365	-0.7496173	0	0	0
13.5	1.365	-0.7626173	0	0	0
14.5	1.365	-0.7716173	0	0	0
15.5	1.365	-0.7786173	0	0	0
16.5	1.365	-0.7836173	0	0	0
17.5	1.365	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.365	-0.7836173	0	0	0
19.5	1.365	-0.7786173	0	0	0
20.5	1.365	-0.7716173	0	0	0
21.5	1.365	-0.7626173	0	0	0
22.5	1.365	-0.7496173	0	0	0
23.5	1.365	-0.7266173	0	0	0
24.5	1.365	-0.7166173	0	0	0
25.5	1.365	-0.6956173	0	0	0
26.5	1.365	-0.6716173	0	0	0
27.5	1.365	-0.6446173	0	0	0
28.5	1.365	-0.6156173	0	0	0
29.5	1.365	-0.5836173	0	0	0
30.5	1.365	-0.5486173	0	0	0
31.5	1.365	-0.5116173	0	0	0
32.5	1.365	-0.4706173	0	0	0
33.5	1.365	-0.4276173	0	0	0
34.45	1.365	-0.3839173	0	0	0
34.5	1.365	-0.3816173	0	0	0
34.85	1.365	-0.3646173	0	0	0
35	1.365	0	0	0	0

prog [m]	Y8 d	Z8 d	fix	Ry	Rz
0	-1.365	0	0	0	0
0.15	-1.365	0	0	0	0
0.5	-1.365	0	0	0	0
0.55	-1.365	0.4403827	0	0	0
1.5	-1.365	0.3073827	0	0	0
2.5	-1.365	0.1743827	0	0	0
3.5	-1.365	0.0513827	0	0	0
4.5	-1.365	-0.0636173	0	0	0
5.5	-1.365	-0.1706173	0	0	0
6.5	-1.365	-0.2686173	0	0	0
7.5	-1.365	-0.3586173	0	0	0
8.5	-1.365	-0.4396173	0	0	0
9.5	-1.365	-0.5116173	0	0	0
10.5	-1.365	-0.5756173	0	0	0
11.5	-1.365	-0.6316173	0	0	0
12.5	-1.365	-0.6776173	0	0	0
13.5	-1.365	-0.7166173	0	0	0
14.5	-1.365	-0.7466173	0	0	0
15.5	-1.365	-0.7676173	0	0	0
16.5	-1.365	-0.7806173	0	0	0
17.5	-1.365	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.365	-0.7806173	0	0	0
19.5	-1.365	-0.7676173	0	0	0
20.5	-1.365	-0.7466173	0	0	0
21.5	-1.365	-0.7166173	0	0	0
22.5	-1.365	-0.6776173	0	0	0
23.5	-1.365	-0.6316173	0	0	0
24.5	-1.365	-0.5756173	0	0	0
25.5	-1.365	-0.5116173	0	0	0
26.5	-1.365	-0.4396173	0	0	0
27.5	-1.365	-0.3586173	0	0	0
28.5	-1.365	-0.2686173	0	0	0
29.5	-1.365	-0.1706173	0	0	0
30.5	-1.365	-0.0636173	0	0	0
31.5	-1.365	0.0513827	0	0	0
32.5	-1.365	0.1743827	0	0	0
33.5	-1.365	0.3073827	0	0	0
34.45	-1.365	0.4403827	0	0	0
34.5	-1.365	0	0	0	0
34.85	-1.365	0	0	0	0
35	-1.365	0	0	0	0

prog [m]	Y7 d	Z7 d	fix	Ry	Rz
0	-1.365	0	0	0	0
0.15	-1.365	-0.3646173	0	0	0
0.5	-1.365	-0.3816173	0	0	0
0.55	-1.365	-0.3839173	0	0	0
1.5	-1.365	-0.4276173	0	0	0
2.5	-1.365	-0.4706173	0	0	0
3.5	-1.365	-0.5116173	0	0	0
4.5	-1.365	-0.5486173	0	0	0
5.5	-1.365	-0.5836173	0	0	0
6.5	-1.365	-0.6156173	0	0	0
7.5	-1.365	-0.6446173	0	0	0
8.5	-1.365	-0.6716173	0	0	0
9.5	-1.365	-0.6956173	0	0	0
10.5	-1.365	-0.7166173	0	0	0
11.5	-1.365	-0.7266173	0	0	0
12.5	-1.365	-0.7496173	0	0	0
13.5	-1.365	-0.7626173	0	0	0
14.5	-1.365	-0.7716173	0	0	0
15.5	-1.365	-0.7786173	0	0	0
16.5	-1.365	-0.7836173	0	0	0
17.5	-1.365	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.365	-0.7836173	0	0	0
19.5	-1.365	-0.7786173	0	0	0
20.5	-1.365	-0.7716173	0	0	0
21.5	-1.365	-0.7626173	0	0	0
22.5	-1.365	-0.7496173	0	0	0
23.5	-1.365	-0.7266173	0	0	0
24.5	-1.365	-0.7166173	0	0	0
25.5	-1.365	-0.6956173	0	0	0
26.5	-1.365	-0.6716173	0	0	0
27.5	-1.365	-0.6446173	0	0	0
28.5	-1.365	-0.6156173	0	0	0
29.5	-1.365	-0.5836173	0	0	0
30.5	-1.365	-0.5486173	0	0	0
31.5	-1.365	-0.5116173	0	0	0
32.5	-1.365	-0.4706173	0	0	0
33.5	-1.365	-0.4276173	0	0	0
34.45	-1.365	-0.3839173	0	0	0
34.5	-1.365	-0.3816173	0	0	0
34.85	-1.365	-0.3646173	0	0	0
35	-1.365	0	0	0	0

prog [m]	Y6 s	Z6 s	fix	Ry	Rz
0	1.595	0	0	0	0
0.15	1.595	0	0	0	0
0.5	1.595	0	0	0	0
0.55	1.595	0.4403827	0	0	0
1.5	1.595	0.3073827	0	0	0
2.5	1.595	0.1743827	0	0	0
3.5	1.595	0.0513827	0	0	0
4.5	1.595	-0.0636173	0	0	0
5.5	1.595	-0.1706173	0	0	0
6.5	1.595	-0.2686173	0	0	0
7.5	1.595	-0.3586173	0	0	0
8.5	1.595	-0.4396173	0	0	0
9.5	1.595	-0.5116173	0	0	0
10.5	1.595	-0.5756173	0	0	0
11.5	1.595	-0.6316173	0	0	0
12.5	1.595	-0.6776173	0	0	0
13.5	1.595	-0.7166173	0	0	0
14.5	1.595	-0.7466173	0	0	0
15.5	1.595	-0.7676173	0	0	0
16.5	1.595	-0.7806173	0	0	0
17.5	1.595	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.595	-0.7806173	0	0	0
19.5	1.595	-0.7676173	0	0	0
20.5	1.595	-0.7466173	0	0	0
21.5	1.595	-0.7166173	0	0	0
22.5	1.595	-0.6776173	0	0	0
23.5	1.595	-0.6316173	0	0	0
24.5	1.595	-0.5756173	0	0	0
25.5	1.595	-0.5116173	0	0	0
26.5	1.595	-0.4396173	0	0	0
27.5	1.595	-0.3586173	0	0	0
28.5	1.595	-0.2686173	0	0	0
29.5	1.595	-0.1706173	0	0	0
30.5	1.595	-0.0636173	0	0	0
31.5	1.595	0.0513827	0	0	0
32.5	1.595	0.1743827	0	0	0
33.5	1.595	0.3073827	0	0	0
34.45	1.595	0.4403827	0	0	0
34.5	1.595	0	0	0	0
34.85	1.595	0	0	0	0
35	1.595	0	0	0	0

prog [m]	Y5 s	Z5 s	fix	Ry	Rz
0	1.595	0	0	0	0
0.15	1.595	-0.3646173	0	0	0
0.5	1.595	-0.3816173	0	0	0
0.55	1.595	-0.3839173	0	0	0
1.5	1.595	-0.4276173	0	0	0
2.5	1.595	-0.4706173	0	0	0
3.5	1.595	-0.5116173	0	0	0
4.5	1.595	-0.5486173	0	0	0
5.5	1.595	-0.5836173	0	0	0
6.5	1.595	-0.6156173	0	0	0
7.5	1.595	-0.6446173	0	0	0
8.5	1.595	-0.6716173	0	0	0
9.5	1.595	-0.6956173	0	0	0
10.5	1.595	-0.7166173	0	0	0
11.5	1.595	-0.7266173	0	0	0
12.5	1.595	-0.7496173	0	0	0
13.5	1.595	-0.7626173	0	0	0
14.5	1.595	-0.7716173	0	0	0
15.5	1.595	-0.7786173	0	0	0
16.5	1.595	-0.7836173	0	0	0
17.5	1.595	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.595	-0.7836173	0	0	0
19.5	1.595	-0.7786173	0	0	0
20.5	1.595	-0.7716173	0	0	0
21.5	1.595	-0.7626173	0	0	0
22.5	1.595	-0.7496173	0	0	0
23.5	1.595	-0.7266173	0	0	0
24.5	1.595	-0.7166173	0	0	0
25.5	1.595	-0.6956173	0	0	0
26.5	1.595	-0.6716173	0	0	0
27.5	1.595	-0.6446173	0	0	0
28.5	1.595	-0.6156173	0	0	0
29.5	1.595	-0.5836173	0	0	0
30.5	1.595	-0.5486173	0	0	0
31.5	1.595	-0.5116173	0	0	0
32.5	1.595	-0.4706173	0	0	0
33.5	1.595	-0.4276173	0	0	0
34.45	1.595	-0.3839173	0	0	0
34.5	1.595	-0.3816173	0	0	0
34.85	1.595	-0.3646173	0	0	0
35	1.595	0	0	0	0

prog [m]	Y6 d	Z6 d	fix	Ry	Rz
0	-1.595	0	0	0	0
0.15	-1.595	0	0	0	0
0.5	-1.595	0	0	0	0
0.55	-1.595	0.4403827	0	0	0
1.5	-1.595	0.3073827	0	0	0
2.5	-1.595	0.1743827	0	0	0
3.5	-1.595	0.0513827	0	0	0
4.5	-1.595	-0.0636173	0	0	0
5.5	-1.595	-0.1706173	0	0	0
6.5	-1.595	-0.2686173	0	0	0
7.5	-1.595	-0.3586173	0	0	0
8.5	-1.595	-0.4396173	0	0	0
9.5	-1.595	-0.5116173	0	0	0
10.5	-1.595	-0.5756173	0	0	0
11.5	-1.595	-0.6316173	0	0	0
12.5	-1.595	-0.6776173	0	0	0
13.5	-1.595	-0.7166173	0	0	0
14.5	-1.595	-0.7466173	0	0	0
15.5	-1.595	-0.7676173	0	0	0
16.5	-1.595	-0.7806173	0	0	0
17.5	-1.595	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.595	-0.7806173	0	0	0
19.5	-1.595	-0.7676173	0	0	0
20.5	-1.595	-0.7466173	0	0	0
21.5	-1.595	-0.7166173	0	0	0
22.5	-1.595	-0.6776173	0	0	0
23.5	-1.595	-0.6316173	0	0	0
24.5	-1.595	-0.5756173	0	0	0
25.5	-1.595	-0.5116173	0	0	0
26.5	-1.595	-0.4396173	0	0	0
27.5	-1.595	-0.3586173	0	0	0
28.5	-1.595	-0.2686173	0	0	0
29.5	-1.595	-0.1706173	0	0	0
30.5	-1.595	-0.0636173	0	0	0
31.5	-1.595	0.0513827	0	0	0
32.5	-1.595	0.1743827	0	0	0
33.5	-1.595	0.3073827	0	0	0
34.45	-1.595	0.4403827	0	0	0
34.5	-1.595	0	0	0	0
34.85	-1.595	0	0	0	0
35	-1.595	0	0	0	0

prog [m]	Y5 d	Z5 d	fix	Ry	Rz
0	-1.595	0	0	0	0
0.15	-1.595	-0.3646173	0	0	0
0.5	-1.595	-0.3816173	0	0	0
0.55	-1.595	-0.3839173	0	0	0
1.5	-1.595	-0.4276173	0	0	0
2.5	-1.595	-0.4706173	0	0	0
3.5	-1.595	-0.5116173	0	0	0
4.5	-1.595	-0.5486173	0	0	0
5.5	-1.595	-0.5836173	0	0	0
6.5	-1.595	-0.6156173	0	0	0
7.5	-1.595	-0.6446173	0	0	0
8.5	-1.595	-0.6716173	0	0	0
9.5	-1.595	-0.6956173	0	0	0
10.5	-1.595	-0.7166173	0	0	0
11.5	-1.595	-0.7266173	0	0	0
12.5	-1.595	-0.7496173	0	0	0
13.5	-1.595	-0.7626173	0	0	0
14.5	-1.595	-0.7716173	0	0	0
15.5	-1.595	-0.7786173	0	0	0
16.5	-1.595	-0.7836173	0	0	0
17.5	-1.595	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.595	-0.7836173	0	0	0
19.5	-1.595	-0.7786173	0	0	0
20.5	-1.595	-0.7716173	0	0	0
21.5	-1.595	-0.7626173	0	0	0
22.5	-1.595	-0.7496173	0	0	0
23.5	-1.595	-0.7266173	0	0	0
24.5	-1.595	-0.7166173	0	0	0
25.5	-1.595	-0.6956173	0	0	0
26.5	-1.595	-0.6716173	0	0	0
27.5	-1.595	-0.6446173	0	0	0
28.5	-1.595	-0.6156173	0	0	0
29.5	-1.595	-0.5836173	0	0	0
30.5	-1.595	-0.5486173	0	0	0
31.5	-1.595	-0.5116173	0	0	0
32.5	-1.595	-0.4706173	0	0	0
33.5	-1.595	-0.4276173	0	0	0
34.45	-1.595	-0.3839173	0	0	0
34.5	-1.595	-0.3816173	0	0	0
34.85	-1.595	-0.3646173	0	0	0
35	-1.595	0	0	0	0

prog [m]	Y4 s	Z4 s	fix	Ry	Rz
0	1.93	0	0	0	0
0.15	1.93	0	0	0	0
0.5	1.93	0	0	0	0
0.55	1.93	0.4403827	0	0	0
1.5	1.93	0.3073827	0	0	0
2.5	1.93	0.1743827	0	0	0
3.5	1.93	0.0513827	0	0	0
4.5	1.93	-0.0636173	0	0	0
5.5	1.93	-0.1706173	0	0	0
6.5	1.93	-0.2686173	0	0	0
7.5	1.93	-0.3586173	0	0	0
8.5	1.93	-0.4396173	0	0	0
9.5	1.93	-0.5116173	0	0	0
10.5	1.93	-0.5756173	0	0	0
11.5	1.93	-0.6316173	0	0	0
12.5	1.93	-0.6776173	0	0	0
13.5	1.93	-0.7166173	0	0	0
14.5	1.93	-0.7466173	0	0	0
15.5	1.93	-0.7676173	0	0	0
16.5	1.93	-0.7806173	0	0	0
17.5	1.93	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.93	-0.7806173	0	0	0
19.5	1.93	-0.7676173	0	0	0
20.5	1.93	-0.7466173	0	0	0
21.5	1.93	-0.7166173	0	0	0
22.5	1.93	-0.6776173	0	0	0
23.5	1.93	-0.6316173	0	0	0
24.5	1.93	-0.5756173	0	0	0
25.5	1.93	-0.5116173	0	0	0
26.5	1.93	-0.4396173	0	0	0
27.5	1.93	-0.3586173	0	0	0
28.5	1.93	-0.2686173	0	0	0
29.5	1.93	-0.1706173	0	0	0
30.5	1.93	-0.0636173	0	0	0
31.5	1.93	0.0513827	0	0	0
32.5	1.93	0.1743827	0	0	0
33.5	1.93	0.3073827	0	0	0
34.45	1.93	0.4403827	0	0	0
34.5	1.93	0	0	0	0
34.85	1.93	0	0	0	0
35	1.93	0	0	0	0

prog [m]	Y3 s	Z3 s	fix	Ry	Rz
0	1.93	0	0	0	0
0.15	1.93	-0.3646173	0	0	0
0.5	1.93	-0.3816173	0	0	0
0.55	1.93	-0.3839173	0	0	0
1.5	1.93	-0.4276173	0	0	0
2.5	1.93	-0.4706173	0	0	0
3.5	1.93	-0.5116173	0	0	0
4.5	1.93	-0.5486173	0	0	0
5.5	1.93	-0.5836173	0	0	0
6.5	1.93	-0.6156173	0	0	0
7.5	1.93	-0.6446173	0	0	0
8.5	1.93	-0.6716173	0	0	0
9.5	1.93	-0.6956173	0	0	0
10.5	1.93	-0.7166173	0	0	0
11.5	1.93	-0.7266173	0	0	0
12.5	1.93	-0.7496173	0	0	0
13.5	1.93	-0.7626173	0	0	0
14.5	1.93	-0.7716173	0	0	0
15.5	1.93	-0.7786173	0	0	0
16.5	1.93	-0.7836173	0	0	0
17.5	1.93	-0.7846173	0	0	0
18.5	1.93	-0.7836173	0	0	0
19.5	1.93	-0.7786173	0	0	0
20.5	1.93	-0.7716173	0	0	0
21.5	1.93	-0.7626173	0	0	0
22.5	1.93	-0.7496173	0	0	0
23.5	1.93	-0.7266173	0	0	0
24.5	1.93	-0.7166173	0	0	0
25.5	1.93	-0.6956173	0	0	0
26.5	1.93	-0.6716173	0	0	0
27.5	1.93	-0.6446173	0	0	0
28.5	1.93	-0.6156173	0	0	0
29.5	1.93	-0.5836173	0	0	0
30.5	1.93	-0.5486173	0	0	0
31.5	1.93	-0.5116173	0	0	0
32.5	1.93	-0.4706173	0	0	0
33.5	1.93	-0.4276173	0	0	0
34.45	1.93	-0.3839173	0	0	0
34.5	1.93	-0.3816173	0	0	0
34.85	1.93	-0.3646173	0	0	0
35	1.93	0	0	0	0

prog [m]	Y4 d	Z4 d	fix	Ry	Rz
0	-1.93	0	0	0	0
0.15	-1.93	0	0	0	0
0.5	-1.93	0	0	0	0
0.55	-1.93	0.4403827	0	0	0
1.5	-1.93	0.3073827	0	0	0
2.5	-1.93	0.1743827	0	0	0
3.5	-1.93	0.0513827	0	0	0
4.5	-1.93	-0.0636173	0	0	0
5.5	-1.93	-0.1706173	0	0	0
6.5	-1.93	-0.2686173	0	0	0
7.5	-1.93	-0.3586173	0	0	0
8.5	-1.93	-0.4396173	0	0	0
9.5	-1.93	-0.5116173	0	0	0
10.5	-1.93	-0.5756173	0	0	0
11.5	-1.93	-0.6316173	0	0	0
12.5	-1.93	-0.6776173	0	0	0
13.5	-1.93	-0.7166173	0	0	0
14.5	-1.93	-0.7466173	0	0	0
15.5	-1.93	-0.7676173	0	0	0
16.5	-1.93	-0.7806173	0	0	0
17.5	-1.93	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.93	-0.7806173	0	0	0
19.5	-1.93	-0.7676173	0	0	0
20.5	-1.93	-0.7466173	0	0	0
21.5	-1.93	-0.7166173	0	0	0
22.5	-1.93	-0.6776173	0	0	0
23.5	-1.93	-0.6316173	0	0	0
24.5	-1.93	-0.5756173	0	0	0
25.5	-1.93	-0.5116173	0	0	0
26.5	-1.93	-0.4396173	0	0	0
27.5	-1.93	-0.3586173	0	0	0
28.5	-1.93	-0.2686173	0	0	0
29.5	-1.93	-0.1706173	0	0	0
30.5	-1.93	-0.0636173	0	0	0
31.5	-1.93	0.0513827	0	0	0
32.5	-1.93	0.1743827	0	0	0
33.5	-1.93	0.3073827	0	0	0
34.45	-1.93	0.4403827	0	0	0
34.5	-1.93	0	0	0	0
34.85	-1.93	0	0	0	0
35	-1.93	0	0	0	0

prog [m]	Y3 d	Z3 d	fix	Ry	Rz
0	-1.93	0	0	0	0
0.15	-1.93	-0.3646173	0	0	0
0.5	-1.93	-0.3816173	0	0	0
0.55	-1.93	-0.3839173	0	0	0
1.5	-1.93	-0.4276173	0	0	0
2.5	-1.93	-0.4706173	0	0	0
3.5	-1.93	-0.5116173	0	0	0
4.5	-1.93	-0.5486173	0	0	0
5.5	-1.93	-0.5836173	0	0	0
6.5	-1.93	-0.6156173	0	0	0
7.5	-1.93	-0.6446173	0	0	0
8.5	-1.93	-0.6716173	0	0	0
9.5	-1.93	-0.6956173	0	0	0
10.5	-1.93	-0.7166173	0	0	0
11.5	-1.93	-0.7266173	0	0	0
12.5	-1.93	-0.7496173	0	0	0
13.5	-1.93	-0.7626173	0	0	0
14.5	-1.93	-0.7716173	0	0	0
15.5	-1.93	-0.7786173	0	0	0
16.5	-1.93	-0.7836173	0	0	0
17.5	-1.93	-0.7846173	0	0	0
18.5	-1.93	-0.7836173	0	0	0
19.5	-1.93	-0.7786173	0	0	0
20.5	-1.93	-0.7716173	0	0	0
21.5	-1.93	-0.7626173	0	0	0
22.5	-1.93	-0.7496173	0	0	0
23.5	-1.93	-0.7266173	0	0	0
24.5	-1.93	-0.7166173	0	0	0
25.5	-1.93	-0.6956173	0	0	0
26.5	-1.93	-0.6716173	0	0	0
27.5	-1.93	-0.6446173	0	0	0
28.5	-1.93	-0.6156173	0	0	0
29.5	-1.93	-0.5836173	0	0	0
30.5	-1.93	-0.5486173	0	0	0
31.5	-1.93	-0.5116173	0	0	0
32.5	-1.93	-0.4706173	0	0	0
33.5	-1.93	-0.4276173	0	0	0
34.45	-1.93	-0.3839173	0	0	0
34.5	-1.93	-0.3816173	0	0	0
34.85	-1.93	-0.3646173	0	0	0
35	-1.93	0	0	0	0

prog [m]	Y2 s	Z2 s	fix	Ry	Rz
0	2.09	0	0	0	0
0.15	2.09	0	0	0	0
0.5	2.09	0	0	0	0
0.55	2.09	0.4403827	0	0	0
1.5	2.09	0.3073827	0	0	0
2.5	2.09	0.1743827	0	0	0
3.5	2.09	0.0513827	0	0	0
4.5	2.09	-0.0636173	0	0	0
5.5	2.09	-0.1706173	0	0	0
6.5	2.09	-0.2686173	0	0	0
7.5	2.09	-0.3586173	0	0	0
8.5	2.09	-0.4396173	0	0	0
9.5	2.09	-0.5116173	0	0	0
10.5	2.09	-0.5756173	0	0	0
11.5	2.09	-0.6316173	0	0	0
12.5	2.09	-0.6776173	0	0	0
13.5	2.09	-0.7166173	0	0	0
14.5	2.09	-0.7466173	0	0	0
15.5	2.09	-0.7676173	0	0	0
16.5	2.09	-0.7806173	0	0	0
17.5	2.09	-0.7846173	0	0	0
18.5	2.09	-0.7806173	0	0	0
19.5	2.09	-0.7676173	0	0	0
20.5	2.09	-0.7466173	0	0	0
21.5	2.09	-0.7166173	0	0	0
22.5	2.09	-0.6776173	0	0	0
23.5	2.09	-0.6316173	0	0	0
24.5	2.09	-0.5756173	0	0	0
25.5	2.09	-0.5116173	0	0	0
26.5	2.09	-0.4396173	0	0	0
27.5	2.09	-0.3586173	0	0	0
28.5	2.09	-0.2686173	0	0	0
29.5	2.09	-0.1706173	0	0	0
30.5	2.09	-0.0636173	0	0	0
31.5	2.09	0.0513827	0	0	0
32.5	2.09	0.1743827	0	0	0
33.5	2.09	0.3073827	0	0	0
34.45	2.09	0.4403827	0	0	0
34.5	2.09	0	0	0	0
34.85	2.09	0	0	0	0
35	2.09	0	0	0	0

prog [m]	Y1 s	Z1 s	fix	Ry	Rz
0	2.09	0	0	0	0
0.15	2.09	-0.3646173	0	0	0
0.5	2.09	-0.3816173	0	0	0
0.55	2.09	-0.3839173	0	0	0
1.5	2.09	-0.4276173	0	0	0
2.5	2.09	-0.4706173	0	0	0
3.5	2.09	-0.5116173	0	0	0
4.5	2.09	-0.5486173	0	0	0
5.5	2.09	-0.5836173	0	0	0
6.5	2.09	-0.6156173	0	0	0
7.5	2.09	-0.6446173	0	0	0
8.5	2.09	-0.6716173	0	0	0
9.5	2.09	-0.6956173	0	0	0
10.5	2.09	-0.7166173	0	0	0
11.5	2.09	-0.7266173	0	0	0
12.5	2.09	-0.7496173	0	0	0
13.5	2.09	-0.7626173	0	0	0
14.5	2.09	-0.7716173	0	0	0
15.5	2.09	-0.7786173	0	0	0
16.5	2.09	-0.7836173	0	0	0
17.5	2.09	-0.7846173	0	0	0
18.5	2.09	-0.7836173	0	0	0
19.5	2.09	-0.7786173	0	0	0
20.5	2.09	-0.7716173	0	0	0
21.5	2.09	-0.7626173	0	0	0
22.5	2.09	-0.7496173	0	0	0
23.5	2.09	-0.7266173	0	0	0
24.5	2.09	-0.7166173	0	0	0
25.5	2.09	-0.6956173	0	0	0
26.5	2.09	-0.6716173	0	0	0
27.5	2.09	-0.6446173	0	0	0
28.5	2.09	-0.6156173	0	0	0
29.5	2.09	-0.5836173	0	0	0
30.5	2.09	-0.5486173	0	0	0
31.5	2.09	-0.5116173	0	0	0
32.5	2.09	-0.4706173	0	0	0
33.5	2.09	-0.4276173	0	0	0
34.45	2.09	-0.3839173	0	0	0
34.5	2.09	-0.3816173	0	0	0
34.85	2.09	-0.3646173	0	0	0
35	2.09	0	0	0	0

prog [m]	Y2 d	Z2 d	fix	Ry	Rz
0	-2.09	0	0	0	0
0.15	-2.09	0	0	0	0
0.5	-2.09	0	0	0	0
0.55	-2.09	0.4403827	0	0	0
1.5	-2.09	0.3073827	0	0	0
2.5	-2.09	0.1743827	0	0	0
3.5	-2.09	0.0513827	0	0	0
4.5	-2.09	-0.0636173	0	0	0
5.5	-2.09	-0.1706173	0	0	0
6.5	-2.09	-0.2686173	0	0	0
7.5	-2.09	-0.3586173	0	0	0
8.5	-2.09	-0.4396173	0	0	0
9.5	-2.09	-0.5116173	0	0	0
10.5	-2.09	-0.5756173	0	0	0
11.5	-2.09	-0.6316173	0	0	0
12.5	-2.09	-0.6776173	0	0	0
13.5	-2.09	-0.7166173	0	0	0
14.5	-2.09	-0.7466173	0	0	0
15.5	-2.09	-0.7676173	0	0	0
16.5	-2.09	-0.7806173	0	0	0
17.5	-2.09	-0.7846173	0	0	0
18.5	-2.09	-0.7806173	0	0	0
19.5	-2.09	-0.7676173	0	0	0
20.5	-2.09	-0.7466173	0	0	0
21.5	-2.09	-0.7166173	0	0	0
22.5	-2.09	-0.6776173	0	0	0
23.5	-2.09	-0.6316173	0	0	0
24.5	-2.09	-0.5756173	0	0	0
25.5	-2.09	-0.5116173	0	0	0
26.5	-2.09	-0.4396173	0	0	0
27.5	-2.09	-0.3586173	0	0	0
28.5	-2.09	-0.2686173	0	0	0
29.5	-2.09	-0.1706173	0	0	0
30.5	-2.09	-0.0636173	0	0	0
31.5	-2.09	0.0513827	0	0	0
32.5	-2.09	0.1743827	0	0	0
33.5	-2.09	0.3073827	0	0	0
34.45	-2.09	0.4403827	0	0	0
34.5	-2.09	0	0	0	0
34.85	-2.09	0	0	0	0
35	-2.09	0	0	0	0

prog [m]	Y1 d	Z1 d	fix	Ry	Rz
0	-2.09	0	0	0	0
0.15	-2.09	-0.3646173	0	0	0
0.5	-2.09	-0.3816173	0	0	0
0.55	-2.09	-0.3839173	0	0	0
1.5	-2.09	-0.4276173	0	0	0
2.5	-2.09	-0.4706173	0	0	0
3.5	-2.09	-0.5116173	0	0	0
4.5	-2.09	-0.5486173	0	0	0
5.5	-2.09	-0.5836173	0	0	0
6.5	-2.09	-0.6156173	0	0	0
7.5	-2.09	-0.6446173	0	0	0
8.5	-2.09	-0.6716173	0	0	0
9.5	-2.09	-0.6956173	0	0	0
10.5	-2.09	-0.7166173	0	0	0
11.5	-2.09	-0.7266173	0	0	0
12.5	-2.09	-0.7496173	0	0	0
13.5	-2.09	-0.7626173	0	0	0
14.5	-2.09	-0.7716173	0	0	0
15.5	-2.09	-0.7786173	0	0	0
16.5	-2.09	-0.7836173	0	0	0
17.5	-2.09	-0.7846173	0	0	0
18.5	-2.09	-0.7836173	0	0	0
19.5	-2.09	-0.7786173	0	0	0
20.5	-2.09	-0.7716173	0	0	0
21.5	-2.09	-0.7626173	0	0	0
22.5	-2.09	-0.7496173	0	0	0
23.5	-2.09	-0.7266173	0	0	0
24.5	-2.09	-0.7166173	0	0	0
25.5	-2.09	-0.6956173	0	0	0
26.5	-2.09	-0.6716173	0	0	0
27.5	-2.09	-0.6446173	0	0	0
28.5	-2.09	-0.6156173	0	0	0
29.5	-2.09	-0.5836173	0	0	0
30.5	-2.09	-0.5486173	0	0	0
31.5	-2.09	-0.5116173	0	0	0
32.5	-2.09	-0.4706173	0	0	0
33.5	-2.09	-0.4276173	0	0	0
34.45	-2.09	-0.3839173	0	0	0
34.5	-2.09	-0.3816173	0	0	0
34.85	-2.09	-0.3646173	0	0	0
35	-2.09	0	0	0	0

## Allegato C – Tendon Prestress Load

Tendon	Load Case	Type	Jacking	Stress Begin (N/mm <sup>2</sup> )	Stress End (N/mm <sup>2</sup> )	Force Begin (N)	Force End (N)	Grouting	Load Group
cavo1 d	cavo1 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo1 d
cavo1 s	cavo1 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo1 s
cavo10 d	cavo10 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo10 d
cavo10 s	cavo10 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo10 s
cavo11 d	cavo11 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo11 d
cavo11 s	cavo11 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo11 s
cavo12 d	cavo12 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo12 d
cavo12 s	cavo12 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo12 s
cavo13 d	cavo13 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo13 d
cavo13 s	cavo13 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo13 s
cavo14 d	cavo14 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo14 d
cavo14 s	cavo14 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo14 s
cavo2 d	cavo2 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo2 d
cavo2 s	cavo2 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo2 s
cavo3 d	cavo3 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo3 d
cavo3 s	cavo3 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo3 s
cavo4 d	cavo4 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo4 d
cavo4 s	cavo4 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo4 s
cavo5 d	cavo5 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo5 d
cavo5 s	cavo5 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo5 s
cavo6 d	cavo6 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo6 d
cavo6 s	cavo6 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo6 s
cavo7 d	cavo7 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo7 d
cavo7 s	cavo7 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo7 s
cavo8 d	cavo8 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo8 d
cavo8 s	cavo8 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo8 s
cavo9 d	cavo9 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo9 d
cavo9 s	cavo9 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo9 s

# Allegato D – Construction Stages del modello della trave con i 28 cavi

## Fase di getto della trave

Stage :    
 Name :   
 Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load |

Group List

Activation  
 Age :  day(s)

Deactivation  
 Element Force  
 Redistribution :  %

Name	Age
trave cassone	0

Name	Redist.
------	---------

Stage :    
 Name :   
 Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load |

Group List

Activation  
 Support / Spring Position  
 Original  Deformed

Name	Position
appoggi	Original
cassero	Original

Stage :    
 Name :   
 Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load |

Group List

Activation  
 Active Day :  day(s)

Name	Day
peso trave ca...	First

## *Fase di tesatura dei cavi di post-tensione*

<p>Stage : <input type="text" value="tesatura"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p>Name : <input type="text" value="tesatura"/></p> <p>Duration : <input type="text" value="7"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Save Result  <input checked="" type="checkbox"/> Stage    <input type="checkbox"/> Additional Steps</p> <p style="text-align: center;">Current Stage Information...</p>	<p>Additional Steps</p> <p>Day : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/></p> <p>( Example: 1, 3, 7, 14 ) <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Clear"/></p> <p>Auto Generation</p> <p>Step Number : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p><input type="button" value="Generate Steps"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Step</th> <th style="width: 50%;">Day</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Step	Day						
Step	Day								
Element   Boundary   Load									
<p>Group List <input type="button" value="..."/></p> <p>trave cassone</p>	<p>Activation</p> <p>Age : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Age</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Age						
Name	Age								
	<p>Deactivation</p> <p>Element Force Redistribution : <input type="text" value="100"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> %</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Redist.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Redist.						
Name	Redist.								

<p>Stage : <input type="text" value="tesatura"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p>Name : <input type="text" value="tesatura"/></p> <p>Duration : <input type="text" value="7"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Save Result  <input checked="" type="checkbox"/> Stage    <input type="checkbox"/> Additional Steps</p> <p style="text-align: center;">Current Stage Information...</p>	<p>Additional Steps</p> <p>Day : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/></p> <p>( Example: 1, 3, 7, 14 ) <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Clear"/></p> <p>Auto Generation</p> <p>Step Number : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p><input type="button" value="Generate Steps"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Step</th> <th style="width: 50%;">Day</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Step	Day						
Step	Day								
Element   Boundary   Load									
<p>Group List <input type="button" value="..."/></p> <p>appoggi</p>	<p>Activation</p> <p>Support / Spring Position  <input type="radio"/> Original    <input checked="" type="radio"/> Deformed</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Position</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Position						
Name	Position								
	<p>Deactivation</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Redist.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>cassero</td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Redist.	cassero					
Name	Redist.								
cassero									

<p>Stage : <input type="text" value="tesatura"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p>Name : <input type="text" value="tesatura"/></p> <p>Duration : <input type="text" value="7"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Save Result  <input checked="" type="checkbox"/> Stage    <input type="checkbox"/> Additional Steps</p> <p style="text-align: center;">Current Stage Information...</p>	<p>Additional Steps</p> <p>Day : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Delete"/></p> <p>( Example: 1, 3, 7, 14 ) <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Clear"/></p> <p>Auto Generation</p> <p>Step Number : <input type="text" value="0"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/></p> <p><input type="button" value="Generate Steps"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Step</th> <th style="width: 50%;">Day</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Step	Day												
Step	Day														
Element   Boundary   Load															
<p>Group List <input type="button" value="..."/></p> <p>peso trave cassone  peso pavimentazione  peso cordoli laterali  peso barriere di sicurezza</p>	<p>Activation</p> <p>Active Day : <input type="text" value="First"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Day</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>cavo 1 d</td><td>First</td></tr> <tr><td>cavo 2 d</td><td>First</td></tr> <tr><td>cavo 3 d</td><td>First</td></tr> <tr><td>cavo 4 d</td><td>First</td></tr> <tr><td>cavo 5 d</td><td>First</td></tr> <tr><td>cavo 6 d</td><td>First</td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Day	cavo 1 d	First	cavo 2 d	First	cavo 3 d	First	cavo 4 d	First	cavo 5 d	First	cavo 6 d	First
Name	Day														
cavo 1 d	First														
cavo 2 d	First														
cavo 3 d	First														
cavo 4 d	First														
cavo 5 d	First														
cavo 6 d	First														
	<p>Deactivation</p> <p>Inactive Day : <input type="text" value="First"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> day(s)</p> <p>Group List</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Name</th> <th style="width: 50%;">Day</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p><input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/></p>	Name	Day												
Name	Day														

## *Fase di applicazione dei carichi permanenti portati*

Stage:  Stage:  Additional Steps: Day: 0 (Example: 1, 3, 7, 14)

Name:  (Add) (Delete) (Modify) (Clear)

Duration:  day(s) Step Day

Save Result:  Stage  Additional Steps

Auto Generation: Step Number: 0 (Generate Steps)

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List:

Activation: Age: 0 day(s)

Deactivation: Element Force: 100 %

Group List: (Empty)

Group List: (Empty)

(Add) (Modify) (Delete) (Add) (Modify) (Delete)

Stage:  Stage:  Additional Steps: Day: 0 (Example: 1, 3, 7, 14)

Name:  (Add) (Delete) (Modify) (Clear)

Duration:  day(s) Step Day

Save Result:  Stage  Additional Steps

Auto Generation: Step Number: 0 (Generate Steps)

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List:

Activation: Support / Spring Position:  Original  Deformed

Deactivation: (Empty)

Group List: (Empty)

Group List: (Empty)

(Add) (Modify) (Delete) (Add) (Delete)

Stage:  Stage:  Additional Steps: Day: 0 (Example: 1, 3, 7, 14)

Name:  (Add) (Delete) (Modify) (Clear)

Duration:  day(s) Step Day

Save Result:  Stage  Additional Steps

Auto Generation: Step Number: 0 (Generate Steps)

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List:

Activation: Active Day: First day(s)

Deactivation: Inactive Day: First day(s)

Group List:

Group List:

Group List:

(Add) (Modify) (Delete) (Add) (Modify) (Delete)

## *Fase di intervento degli effetti reologici del calcestruzzo*

Stage :

Name :

Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Additional Steps

Day :

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Step	Day
1	3
2	6
3	16
4	40

Auto Generation

Step Number :

---

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List

trave cassone

Activation

Age :  day(s)

Group List

Name	Age

Deactivation

Element Force  %

Redistribution :  %

Group List

Name	Redist.

Stage :

Name :

Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Additional Steps

Day :

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Step	Day
1	3
2	6
3	16
4	40

Auto Generation

Step Number :

---

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List

appoggi  
cassero

Activation

Support / Spring Position

Original     Deformed

Group List

Name	Position

Deactivation

Group List

Name

Stage :

Name :

Duration :  day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Additional Steps

Day :

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Step	Day
1	3
2	6
3	16
4	40

Auto Generation

Step Number :

---

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List

peso trave cassone  
peso pavimentazione  
peso cordoli laterali  
peso barriere di sicurezza  
cavo 1 d  
cavo 2 d  
cavo 3 d  
cavo 4 d  
cavo 5 d  
cavo 6 d  
cavo 7 d  
cavo 8 d  
cavo 9 d  
cavo 10 d  
cavo 11 d  
cavo 12 d  
cavo 13 d  
cavo 14 d  
cavo 1 s

Activation

Active Day :  day(s)

Group List

Name	Day

Deactivation

Inactive Day :  day(s)

Group List

Name	Day

## Allegato E – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i 28 cavi di precompressione nella Combinazione Quasi Permanente

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.24E-01	3.24E-01	-5.10E+00	-5.10E+00
3	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.92E-01	3.92E-01	-5.20E+00	-5.20E+00
4	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.40E+00	-4.40E+00	-3.26E+00	-3.26E+00
5	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.82E+00	-4.82E+00	-2.74E+00	-2.74E+00
6	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.22E+00	-5.22E+00	-2.26E+00	-2.26E+00
7	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.60E+00	-5.60E+00	-1.83E+00	-1.83E+00
8	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.93E+00	-5.93E+00	-1.46E+00	-1.46E+00
9	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.22E+00	-6.22E+00	-1.16E+00	-1.16E+00
10	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.48E+00	-6.48E+00	-9.16E-01	-9.16E-01
11	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.68E+00	-6.68E+00	-7.27E-01	-7.27E-01
12	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.86E+00	-6.86E+00	-5.80E-01	-5.80E-01
13	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.00E+00	-7.00E+00	-4.82E-01	-4.82E-01
14	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.14E+00	-3.78E-01	-3.78E-01
15	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.23E+00	-7.23E+00	-3.49E-01	-3.49E-01
16	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.25E+00	-7.25E+00	-3.96E-01	-3.96E-01
17	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.30E+00	-7.30E+00	-3.90E-01	-3.90E-01
18	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.33E+00	-7.33E+00	-3.99E-01	-3.99E-01
19	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.33E+00	-7.33E+00	-4.29E-01	-4.29E-01
20	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.33E+00	-7.33E+00	-4.71E-01	-4.71E-01
21	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.33E+00	-7.33E+00	-4.64E-01	-4.64E-01
22	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.33E+00	-7.33E+00	-4.35E-01	-4.35E-01
23	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.32E+00	-7.32E+00	-4.06E-01	-4.06E-01
24	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.29E+00	-7.29E+00	-3.98E-01	-3.98E-01
25	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.24E+00	-7.24E+00	-4.06E-01	-4.06E-01
26	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.22E+00	-7.22E+00	-3.61E-01	-3.61E-01
27	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.14E+00	-3.92E-01	-3.92E-01
28	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.99E+00	-6.99E+00	-4.99E-01	-4.99E-01
29	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.85E+00	-6.85E+00	-6.00E-01	-6.00E-01
30	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.68E+00	-6.68E+00	-7.49E-01	-7.49E-01
31	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.47E+00	-6.47E+00	-9.40E-01	-9.40E-01
32	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.21E+00	-6.21E+00	-1.19E+00	-1.19E+00
33	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.92E+00	-5.92E+00	-1.49E+00	-1.49E+00
34	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.59E+00	-5.59E+00	-1.86E+00	-1.86E+00
35	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.21E+00	-5.21E+00	-2.29E+00	-2.29E+00
36	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.81E+00	-4.81E+00	-2.77E+00	-2.77E+00
37	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.39E+00	-4.39E+00	-3.29E+00	-3.29E+00
38	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.94E-01	3.94E-01	-5.23E+00	-5.23E+00
39	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.26E-01	3.26E-01	-5.13E+00	-5.13E+00
40	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

**Allegato F – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i  
28 cavi di precompressione nella Combinazione Caratteristica**

Elem	Load	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	SLE ch tinf(all)	2/4	1.36E-02	1.36E-02	-1.84E-02	-1.84E-02
2	SLE ch tinf(all)	2/4	3.82E-01	3.82E-01	-5.18E+00	-5.18E+00
3	SLE ch tinf(all)	2/4	4.87E-01	4.87E-01	-5.33E+00	-5.33E+00
4	SLE ch tinf(all)	2/4	-4.67E+00	-4.67E+00	-3.39E+00	-3.39E+00
5	SLE ch tinf(all)	2/4	-5.63E+00	-5.63E+00	-2.87E+00	-2.87E+00
6	SLE ch tinf(all)	2/4	-6.56E+00	-6.56E+00	-2.38E+00	-2.38E+00
7	SLE ch tinf(all)	2/4	-7.43E+00	-7.43E+00	-1.95E+00	-1.95E+00
8	SLE ch tinf(all)	2/4	-8.21E+00	-8.21E+00	-1.58E+00	-1.58E+00
9	SLE ch tinf(all)	2/4	-8.92E+00	-8.92E+00	2.41E+00	2.41E+00
10	SLE ch tinf(all)	2/4	-9.54E+00	-9.54E+00	3.14E+00	3.14E+00
11	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.01E+01	-1.01E+01	3.75E+00	3.75E+00
12	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.06E+01	-1.06E+01	4.27E+00	4.27E+00
13	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.10E+01	-1.10E+01	4.69E+00	4.69E+00
14	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.13E+01	-1.13E+01	5.07E+00	5.07E+00
15	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.16E+01	-1.16E+01	5.34E+00	5.34E+00
16	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.18E+01	-1.18E+01	5.47E+00	5.47E+00
17	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.19E+01	-1.19E+01	5.63E+00	5.63E+00
18	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.20E+01	-1.20E+01	5.72E+00	5.72E+00
19	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.21E+01	-1.21E+01	5.76E+00	5.76E+00
20	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.21E+01	-1.21E+01	5.75E+00	5.75E+00
21	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.21E+01	-1.21E+01	5.76E+00	5.76E+00
22	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.21E+01	-1.21E+01	5.76E+00	5.76E+00
23	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.20E+01	-1.20E+01	5.72E+00	5.72E+00
24	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.19E+01	-1.19E+01	5.62E+00	5.62E+00
25	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.18E+01	-1.18E+01	5.46E+00	5.46E+00
26	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.16E+01	-1.16E+01	5.32E+00	5.32E+00
27	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.13E+01	-1.13E+01	5.06E+00	5.06E+00
28	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.09E+01	-1.09E+01	4.68E+00	4.68E+00
29	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.05E+01	-1.05E+01	4.25E+00	4.25E+00
30	SLE ch tinf(all)	2/4	-1.01E+01	-1.01E+01	3.73E+00	3.73E+00
31	SLE ch tinf(all)	2/4	-9.53E+00	-9.53E+00	3.11E+00	3.11E+00
32	SLE ch tinf(all)	2/4	-8.91E+00	-8.91E+00	2.38E+00	2.38E+00
33	SLE ch tinf(all)	2/4	-8.20E+00	-8.20E+00	-1.61E+00	-1.61E+00
34	SLE ch tinf(all)	2/4	-7.42E+00	-7.42E+00	-1.98E+00	-1.98E+00
35	SLE ch tinf(all)	2/4	-6.55E+00	-6.55E+00	-2.41E+00	-2.41E+00
36	SLE ch tinf(all)	2/4	-5.63E+00	-5.63E+00	-2.90E+00	-2.90E+00
37	SLE ch tinf(all)	2/4	-4.67E+00	-4.67E+00	-3.42E+00	-3.42E+00
38	SLE ch tinf(all)	2/4	4.89E-01	4.89E-01	-5.35E+00	-5.35E+00
39	SLE ch tinf(all)	2/4	3.84E-01	3.84E-01	-5.21E+00	-5.21E+00
40	SLE ch tinf(all)	2/4	1.36E-02	1.36E-02	-1.84E-02	-1.84E-02

# Allegato G – Construction Stages del modello della trave con i 26 cavi

## *Fase di perdita di precompressione dei cavi 11d e 11s*

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 trave cassone

Activation  
 Age : 0 day(s)

Group List  
 Name Age

Deactivation  
 Element Force  
 Redistribution : 100 %

Group List  
 Name Redist.

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )  
 Add Delete  
 Modify Clear  
 Auto Generation  
 Step Number : 0  
 Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Add Modify Delete Add Modify Delete

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 appoggi  
 cassero

Activation  
 Support / Spring Position  
 Original  Deformed

Group List  
 Name Position

Deactivation

Group List  
 Name

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )  
 Add Delete  
 Modify Clear  
 Auto Generation  
 Step Number : 0  
 Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Add Modify Delete Add Delete

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 peso trave cassone  
 peso pavimentazione  
 peso cordoli laterali  
 peso barriere di sicurezza  
 cavo1 d  
 cavo2 d  
 cavo3 d  
 cavo4 d  
 cavo5 d  
 cavo6 d  
 cavo7 d  
 cavo8 d  
 cavo9 d  
 cavo10 d  
 cavo12 d  
 cavo13 d  
 cavo14 d  
 cavo1 s  
 cavo2 s

Activation  
 Active Day : First day(s)

Group List  
 Name Day

Deactivation  
 Inactive Day : First day(s)

Group List  
 Name Day  
 cavo11 d First  
 cavo11 s First

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )  
 Add Delete  
 Modify Clear  
 Auto Generation  
 Step Number : 0  
 Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Add Modify Delete Add Modify Delete

## *Fase di perdita di precompressione dei cavi 11d e 3s*

Stage : perdita 2 cavi

Name : perdita 2 cavi

Duration : 9792 day(s)

Save Result

Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Additional Steps

Day : 0

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation

Step Number : 0

Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

---

Element | Boundary | Load

Group List

trave cassone

Activation

Age : 0 day(s)

Name	Age

Add Modify Delete

Deactivation

Element Force

Redistribution : 100 %

Name	Redist.

Add Modify Delete

Stage : perdita 2 cavi

Name : perdita 2 cavi

Duration : 9792 day(s)

Save Result

Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Additional Steps

Day : 0

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation

Step Number : 0

Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

---

Element | Boundary | Load

Group List

appoggi  
cassero

Activation

Support / Spring Position

Original  Deformed

Name	Position

Add Modify Delete

Deactivation

Name

Add Delete

Stage : perdita 2 cavi

Name : perdita 2 cavi

Duration : 9792 day(s)

Save Result

Stage  Additional Steps

Current Stage Information...

Additional Steps

Day : 0

( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation

Step Number : 0

Generate Steps

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

---

Element | Boundary | Load

Group List

peso trave cassone  
peso pavimentazione  
peso cordoli laterali  
peso barriere di sicurezza  
cavo1 d  
cavo2 d  
cavo3 d  
cavo4 d  
cavo5 d  
cavo6 d  
cavo7 d  
cavo8 d  
cavo9 d  
cavo10 d  
cavo12 d  
cavo13 d  
cavo14 d  
cavo1 s  
cavo2 s

Activation

Active Day : First day(s)

Name	Day

Add Modify Delete

Deactivation

Inactive Day : First day(s)

Name	Day
cavo11 d	First
cavo3 s	First

Add Modify Delete

157

## *Fase di perdita di precompressione dei cavi 11d e 3d*

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 ...  
 trave cassone

Activation  
 Age : 0 day(s)

Deactivation  
 Element Force  
 Redistribution : 100 %

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation  
 Step Number : 0

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Generate Steps

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 ...  
 appoggi  
 cassero

Activation  
 Support / Spring Position  
 Original     Deformed

Deactivation

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation  
 Step Number : 0

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Generate Steps

Stage  
 Stage : perdita 2 cavi  
 Name : perdita 2 cavi  
 Duration : 9792 day(s)

Save Result  
 Stage     Additional Steps

Current Stage Information...

Element | Boundary | Load

Group List  
 ...  
 peso trave cassone  
 peso pavimentazione  
 peso cordoli laterali  
 peso barriere di sicurezza  
 cavo 1 d  
 cavo 2 d  
 cavo 4 d  
 cavo 5 d  
 cavo 6 d  
 cavo 7 d  
 cavo 8 d  
 cavo 9 d  
 cavo 10 d  
 cavo 12 d  
 cavo 13 d  
 cavo 14 d  
 cavo 1 s  
 cavo 2 s  
 cavo 3 s

Activation  
 Active Day : First day(s)

Deactivation  
 Inactive Day : First day(s)

Additional Steps  
 Day : 0  
 ( Example: 1, 3, 7, 14 )

Auto Generation  
 Step Number : 0

Step	Day
1	2
2	5
3	12
4	28

Generate Steps

**Allegato H – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in  
assenza dei cavi 11d e 11s nella Combinazione Quasi Permanente**

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.82E-01	2.82E-01	-4.43E+00	-4.43E+00
3	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.42E-01	3.42E-01	-4.51E+00	-4.51E+00
4	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.47E+00	-4.47E+00	-2.55E+00	-2.55E+00
5	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.93E+00	-4.93E+00	-1.98E+00	-1.98E+00
6	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.37E+00	-5.37E+00	-1.46E+00	-1.46E+00
7	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.78E+00	-5.78E+00	-9.89E-01	-9.89E-01
8	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.14E+00	-6.14E+00	-5.91E-01	-5.91E-01
9	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.45E+00	-6.45E+00	-2.66E-01	-2.66E-01
10	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.73E+00	-6.73E+00	2.67E-03	2.67E-03
11	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.95E+00	-6.95E+00	2.09E-01	2.09E-01
12	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.14E+00	3.70E-01	3.70E-01
13	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.29E+00	-7.29E+00	4.80E-01	4.80E-01
14	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.44E+00	-7.44E+00	5.90E-01	5.90E-01
15	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.53E+00	-7.53E+00	6.28E-01	6.28E-01
16	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.56E+00	-7.56E+00	5.93E-01	5.93E-01
17	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.62E+00	-7.62E+00	6.03E-01	6.03E-01
18	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.65E+00	-7.65E+00	5.97E-01	5.97E-01
19	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.66E+00	-7.66E+00	5.70E-01	5.70E-01
20	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.66E+00	-7.66E+00	5.30E-01	5.30E-01
21	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.66E+00	-7.66E+00	5.39E-01	5.39E-01
22	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.66E+00	-7.66E+00	5.67E-01	5.67E-01
23	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.65E+00	-7.65E+00	5.93E-01	5.93E-01
24	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.61E+00	-7.61E+00	5.98E-01	5.98E-01
25	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.56E+00	-7.56E+00	5.87E-01	5.87E-01
26	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.53E+00	-7.53E+00	6.20E-01	6.20E-01
27	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.44E+00	-7.44E+00	5.80E-01	5.80E-01
28	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.29E+00	-7.29E+00	4.67E-01	4.67E-01
29	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.14E+00	3.55E-01	3.55E-01
30	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.95E+00	-6.95E+00	1.91E-01	1.91E-01
31	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.72E+00	-6.72E+00	-1.77E-02	-1.77E-02
32	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.45E+00	-6.45E+00	-2.88E-01	-2.88E-01
33	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.13E+00	-6.13E+00	-6.16E-01	-6.16E-01
34	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.77E+00	-5.77E+00	-1.01E+00	-1.01E+00
35	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.36E+00	-5.36E+00	-1.48E+00	-1.48E+00
36	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.92E+00	-4.92E+00	-2.01E+00	-2.01E+00
37	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.47E+00	-4.47E+00	-2.58E+00	-2.58E+00
38	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	3.44E-01	3.44E-01	-4.54E+00	-4.54E+00
39	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.83E-01	2.83E-01	-4.45E+00	-4.45E+00
40	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

**Allegato I – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in  
assenza dei cavi 11d e 3s nella Combinazione Quasi Permanente**

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	5.07E-02	5.13E-01	-4.33E+00	-4.53E+00
3	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	1.11E-01	5.74E-01	-4.41E+00	-4.61E+00
4	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.70E+00	-4.24E+00	-2.45E+00	-2.65E+00
5	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.16E+00	-4.70E+00	-1.88E+00	-2.08E+00
6	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.60E+00	-5.14E+00	-1.35E+00	-1.56E+00
7	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.01E+00	-5.54E+00	-8.87E-01	-1.09E+00
8	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.38E+00	-5.90E+00	-4.88E-01	-6.93E-01
9	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.69E+00	-6.22E+00	-1.62E-01	-3.69E-01
10	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.97E+00	-6.49E+00	1.08E-01	-1.01E-01
11	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.19E+00	-6.71E+00	3.15E-01	1.05E-01
12	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.39E+00	-6.90E+00	4.76E-01	2.65E-01
13	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.54E+00	-7.05E+00	5.87E-01	3.75E-01
14	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.69E+00	-7.19E+00	6.98E-01	4.84E-01
15	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.78E+00	-7.29E+00	7.36E-01	5.21E-01
16	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.81E+00	-7.32E+00	7.03E-01	4.85E-01
17	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.87E+00	-7.37E+00	7.12E-01	4.94E-01
18	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.90E+00	-7.40E+00	7.07E-01	4.88E-01
19	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.91E+00	-7.41E+00	6.80E-01	4.61E-01
20	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.91E+00	-7.41E+00	6.41E-01	4.21E-01
21	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.91E+00	-7.41E+00	6.50E-01	4.30E-01
22	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.91E+00	-7.41E+00	6.78E-01	4.58E-01
23	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.90E+00	-7.40E+00	7.03E-01	4.84E-01
24	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.87E+00	-7.36E+00	7.08E-01	4.89E-01
25	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.81E+00	-7.31E+00	6.97E-01	4.79E-01
26	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.78E+00	-7.28E+00	7.29E-01	5.12E-01
27	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.68E+00	-7.19E+00	6.88E-01	4.73E-01
28	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.53E+00	-7.04E+00	5.74E-01	3.61E-01
29	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.38E+00	-6.89E+00	4.61E-01	2.49E-01
30	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.19E+00	-6.70E+00	2.97E-01	8.62E-02
31	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.96E+00	-6.48E+00	8.77E-02	-1.22E-01
32	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.69E+00	-6.21E+00	-1.84E-01	-3.92E-01
33	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.37E+00	-5.89E+00	-5.12E-01	-7.18E-01
34	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.01E+00	-5.54E+00	-9.12E-01	-1.12E+00
35	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.60E+00	-5.13E+00	-1.38E+00	-1.58E+00
36	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.15E+00	-4.69E+00	-1.91E+00	-2.11E+00
37	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.70E+00	-4.24E+00	-2.48E+00	-2.68E+00
38	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	1.11E-01	5.77E-01	-4.44E+00	-4.64E+00
39	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	5.10E-02	5.16E-01	-4.35E+00	-4.55E+00
40	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

**Allegato J - Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave in  
assenza dei cavi 11d e 3d nella Combinazione Quasi Permanente**

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	7.24E-01	-1.60E-01	-4.62E+00	-4.23E+00
3	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	7.85E-01	-1.00E-01	-4.70E+00	-4.32E+00
4	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.03E+00	-4.91E+00	-2.74E+00	-2.36E+00
5	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.49E+00	-5.37E+00	-2.17E+00	-1.79E+00
6	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.93E+00	-5.81E+00	-1.65E+00	-1.26E+00
7	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.33E+00	-6.23E+00	-1.18E+00	-7.92E-01
8	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.69E+00	-6.59E+00	-7.86E-01	-3.93E-01
9	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.00E+00	-6.91E+00	-4.62E-01	-6.57E-02
10	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.27E+00	-7.19E+00	-1.95E-01	2.04E-01
11	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.49E+00	-7.42E+00	1.01E-02	4.12E-01
12	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.68E+00	-7.61E+00	1.70E-01	5.75E-01
13	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.82E+00	-7.76E+00	2.79E-01	6.86E-01
14	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.97E+00	-7.91E+00	3.87E-01	7.97E-01
15	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.06E+00	-8.01E+00	4.24E-01	8.37E-01
16	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.09E+00	-8.04E+00	3.88E-01	8.03E-01
17	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.14E+00	-8.10E+00	3.96E-01	8.13E-01
18	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.17E+00	-8.13E+00	3.90E-01	8.08E-01
19	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.18E+00	-8.14E+00	3.62E-01	7.82E-01
20	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.17E+00	-8.14E+00	3.22E-01	7.43E-01
21	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.18E+00	-8.15E+00	3.31E-01	7.52E-01
22	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.18E+00	-8.14E+00	3.59E-01	7.80E-01
23	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.17E+00	-8.13E+00	3.86E-01	8.05E-01
24	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.13E+00	-8.10E+00	3.91E-01	8.09E-01
25	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.08E+00	-8.04E+00	3.81E-01	7.98E-01
26	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-7.05E+00	-8.01E+00	4.15E-01	8.29E-01
27	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.96E+00	-7.91E+00	3.76E-01	7.88E-01
28	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.82E+00	-7.76E+00	2.65E-01	6.74E-01
29	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.67E+00	-7.60E+00	1.54E-01	5.60E-01
30	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.48E+00	-7.41E+00	-8.54E-03	3.95E-01
31	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-6.26E+00	-7.18E+00	-2.16E-01	1.85E-01
32	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.99E+00	-6.90E+00	-4.85E-01	-8.75E-02
33	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.68E+00	-6.59E+00	-8.11E-01	-4.17E-01
34	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-5.32E+00	-6.22E+00	-1.21E+00	-8.17E-01
35	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.92E+00	-5.81E+00	-1.67E+00	-1.29E+00
36	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.48E+00	-5.36E+00	-2.20E+00	-1.82E+00
37	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	-4.03E+00	-4.91E+00	-2.77E+00	-2.38E+00
38	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	7.89E-01	-1.01E-01	-4.73E+00	-4.34E+00
39	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	7.29E-01	-1.61E-01	-4.64E+00	-4.26E+00
40	Summation	tempo infinito	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

## Allegato K – Un riferimento dello StressHead-CarboStress post-tensioning system: Il Ponte Sandacher



### Sandacher Bridge

#### Final coupling joint strengthened with post-tensioned CFRP plates

**All tensioning works completed**

As part of the normal maintenance work on the Sandacher overpass in Spreitenbach, the bridge was also strengthened in phases using the StressHead CarboStress<sup>®</sup> system. The fourth and final phase of the tensioning works was recently completed. This work to the final cable coupling joint was located above a main Swiss Railways traffic route, and so in order to prevent the rail operations being disrupted, the work was carried out over several night-time operations. When the last train had passed each evening, the two tracks were blocked so that a mobile scaffold could be erected across the lines; then before the arrival of the first train in the morning, this was removed so that the trains could run to timetable again. After the necessary preparatory works, the 18 StressHead CarboStress<sup>®</sup> systems were installed and tensioned in a total of just three night-time operations of only 2 hours each.



Figure 01: Mobile scaffolding structure



Figure 02: Tensioned StressHead CarboStress<sup>®</sup> systems

**Background information**

The Sandacher overpass bridge was originally built in 1969/70 and is a prestressed concrete structure, which forms the crossing over the N1 national highway, the Limmat Valley Marshalling Yard rail tracks, and the Dietlikon-Killwangen Mainline tracks between Spreitenbach and the Althard area.

No major repair works had been carried out on the Sandacher bridge structure since its construction and routine structural surveys now revealed that - amongst other things - all four coupling joints in the main post tensioned structure were cracked. These were separate cracks each of about 1 mm maximum width.

The cracks that were present in all of the coupling joints were cleaned out and then they were compressed locally by the installation of the external post-tensioning system (tensioned CFRP plates totalling about 4,000 kN per joint). Each coupling joint was strengthened with 18 StressHead CarboStress<sup>®</sup> systems at 220 kN post-tensioning force.

## Allegato L - I 18 tracciati delle lastre pultruse CFRP

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.1	0	0	0	0
0.15	-0.1	0	0	0	0
0.5	-0.1	0	0	0	0
0.55	-0.1	0	0	0	0
1.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
2.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
3.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
4.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
5.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
6.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
7.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
8.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
9.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
10.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
11.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
12.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
13.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
14.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
15.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
16.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
17.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
18.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
19.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
20.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
21.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
22.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
23.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
24.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
25.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
26.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
27.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
28.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
29.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
30.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
31.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
32.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
33.5	-0.1	-0.86592	0	0	0
34.45	-0.1	0	0	0	0
34.5	-0.1	0	0	0	0
34.85	-0.1	0	0	0	0
35	-0.1	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.1	0	0	0	0
0.15	0.1	0	0	0	0
0.5	0.1	0	0	0	0
0.55	0.1	0	0	0	0
1.5	0.1	-0.86592	0	0	0
2.5	0.1	-0.86592	0	0	0
3.5	0.1	-0.86592	0	0	0
4.5	0.1	-0.86592	0	0	0
5.5	0.1	-0.86592	0	0	0
6.5	0.1	-0.86592	0	0	0
7.5	0.1	-0.86592	0	0	0
8.5	0.1	-0.86592	0	0	0
9.5	0.1	-0.86592	0	0	0
10.5	0.1	-0.86592	0	0	0
11.5	0.1	-0.86592	0	0	0
12.5	0.1	-0.86592	0	0	0
13.5	0.1	-0.86592	0	0	0
14.5	0.1	-0.86592	0	0	0
15.5	0.1	-0.86592	0	0	0
16.5	0.1	-0.86592	0	0	0
17.5	0.1	-0.86592	0	0	0
18.5	0.1	-0.86592	0	0	0
19.5	0.1	-0.86592	0	0	0
20.5	0.1	-0.86592	0	0	0
21.5	0.1	-0.86592	0	0	0
22.5	0.1	-0.86592	0	0	0
23.5	0.1	-0.86592	0	0	0
24.5	0.1	-0.86592	0	0	0
25.5	0.1	-0.86592	0	0	0
26.5	0.1	-0.86592	0	0	0
27.5	0.1	-0.86592	0	0	0
28.5	0.1	-0.86592	0	0	0
29.5	0.1	-0.86592	0	0	0
30.5	0.1	-0.86592	0	0	0
31.5	0.1	-0.86592	0	0	0
32.5	0.1	-0.86592	0	0	0
33.5	0.1	-0.86592	0	0	0
34.45	0.1	0	0	0	0
34.5	0.1	0	0	0	0
34.85	0.1	0	0	0	0
35	0.1	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.3	0	0	0	0
0.15	-0.3	0	0	0	0
0.5	-0.3	0	0	0	0
0.55	-0.3	0	0	0	0
1.5	-0.3	0	0	0	0
2.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
3.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
4.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
5.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
6.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
7.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
8.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
9.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
10.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
11.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
12.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
13.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
14.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
15.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
16.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
17.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
18.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
19.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
20.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
21.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
22.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
23.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
24.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
25.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
26.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
27.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
28.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
29.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
30.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
31.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
32.5	-0.3	-0.86592	0	0	0
33.5	-0.3	0	0	0	0
34.45	-0.3	0	0	0	0
34.5	-0.3	0	0	0	0
34.85	-0.3	0	0	0	0
35	-0.3	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.3	0	0	0	0
0.15	0.3	0	0	0	0
0.5	0.3	0	0	0	0
0.55	0.3	0	0	0	0
1.5	0.3	0	0	0	0
2.5	0.3	-0.86592	0	0	0
3.5	0.3	-0.86592	0	0	0
4.5	0.3	-0.86592	0	0	0
5.5	0.3	-0.86592	0	0	0
6.5	0.3	-0.86592	0	0	0
7.5	0.3	-0.86592	0	0	0
8.5	0.3	-0.86592	0	0	0
9.5	0.3	-0.86592	0	0	0
10.5	0.3	-0.86592	0	0	0
11.5	0.3	-0.86592	0	0	0
12.5	0.3	-0.86592	0	0	0
13.5	0.3	-0.86592	0	0	0
14.5	0.3	-0.86592	0	0	0
15.5	0.3	-0.86592	0	0	0
16.5	0.3	-0.86592	0	0	0
17.5	0.3	-0.86592	0	0	0
18.5	0.3	-0.86592	0	0	0
19.5	0.3	-0.86592	0	0	0
20.5	0.3	-0.86592	0	0	0
21.5	0.3	-0.86592	0	0	0
22.5	0.3	-0.86592	0	0	0
23.5	0.3	-0.86592	0	0	0
24.5	0.3	-0.86592	0	0	0
25.5	0.3	-0.86592	0	0	0
26.5	0.3	-0.86592	0	0	0
27.5	0.3	-0.86592	0	0	0
28.5	0.3	-0.86592	0	0	0
29.5	0.3	-0.86592	0	0	0
30.5	0.3	-0.86592	0	0	0
31.5	0.3	-0.86592	0	0	0
32.5	0.3	-0.86592	0	0	0
33.5	0.3	0	0	0	0
34.45	0.3	0	0	0	0
34.5	0.3	0	0	0	0
34.85	0.3	0	0	0	0
35	0.3	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.5	0	0	0	0
0.15	-0.5	0	0	0	0
0.5	-0.5	0	0	0	0
0.55	-0.5	0	0	0	0
1.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
2.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
3.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
4.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
5.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
6.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
7.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
8.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
9.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
10.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
11.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
12.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
13.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
14.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
15.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
16.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
17.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
18.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
19.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
20.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
21.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
22.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
23.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
24.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
25.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
26.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
27.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
28.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
29.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
30.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
31.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
32.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
33.5	-0.5	-0.86592	0	0	0
34.45	-0.5	0	0	0	0
34.5	-0.5	0	0	0	0
34.85	-0.5	0	0	0	0
35	-0.5	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.5	0	0	0	0
0.15	0.5	0	0	0	0
0.5	0.5	0	0	0	0
0.55	0.5	0	0	0	0
1.5	0.5	-0.86592	0	0	0
2.5	0.5	-0.86592	0	0	0
3.5	0.5	-0.86592	0	0	0
4.5	0.5	-0.86592	0	0	0
5.5	0.5	-0.86592	0	0	0
6.5	0.5	-0.86592	0	0	0
7.5	0.5	-0.86592	0	0	0
8.5	0.5	-0.86592	0	0	0
9.5	0.5	-0.86592	0	0	0
10.5	0.5	-0.86592	0	0	0
11.5	0.5	-0.86592	0	0	0
12.5	0.5	-0.86592	0	0	0
13.5	0.5	-0.86592	0	0	0
14.5	0.5	-0.86592	0	0	0
15.5	0.5	-0.86592	0	0	0
16.5	0.5	-0.86592	0	0	0
17.5	0.5	-0.86592	0	0	0
18.5	0.5	-0.86592	0	0	0
19.5	0.5	-0.86592	0	0	0
20.5	0.5	-0.86592	0	0	0
21.5	0.5	-0.86592	0	0	0
22.5	0.5	-0.86592	0	0	0
23.5	0.5	-0.86592	0	0	0
24.5	0.5	-0.86592	0	0	0
25.5	0.5	-0.86592	0	0	0
26.5	0.5	-0.86592	0	0	0
27.5	0.5	-0.86592	0	0	0
28.5	0.5	-0.86592	0	0	0
29.5	0.5	-0.86592	0	0	0
30.5	0.5	-0.86592	0	0	0
31.5	0.5	-0.86592	0	0	0
32.5	0.5	-0.86592	0	0	0
33.5	0.5	-0.86592	0	0	0
34.45	0.5	0	0	0	0
34.5	0.5	0	0	0	0
34.85	0.5	0	0	0	0
35	0.5	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.7	0	0	0	0
0.15	-0.7	0	0	0	0
0.5	-0.7	0	0	0	0
0.55	-0.7	0	0	0	0
1.5	-0.7	0	0	0	0
2.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
3.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
4.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
5.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
6.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
7.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
8.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
9.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
10.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
11.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
12.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
13.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
14.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
15.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
16.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
17.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
18.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
19.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
20.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
21.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
22.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
23.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
24.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
25.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
26.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
27.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
28.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
29.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
30.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
31.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
32.5	-0.7	-0.86592	0	0	0
33.5	-0.7	0	0	0	0
34.45	-0.7	0	0	0	0
34.5	-0.7	0	0	0	0
34.85	-0.7	0	0	0	0
35	-0.7	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.7	0	0	0	0
0.15	0.7	0	0	0	0
0.5	0.7	0	0	0	0
0.55	0.7	0	0	0	0
1.5	0.7	0	0	0	0
2.5	0.7	-0.86592	0	0	0
3.5	0.7	-0.86592	0	0	0
4.5	0.7	-0.86592	0	0	0
5.5	0.7	-0.86592	0	0	0
6.5	0.7	-0.86592	0	0	0
7.5	0.7	-0.86592	0	0	0
8.5	0.7	-0.86592	0	0	0
9.5	0.7	-0.86592	0	0	0
10.5	0.7	-0.86592	0	0	0
11.5	0.7	-0.86592	0	0	0
12.5	0.7	-0.86592	0	0	0
13.5	0.7	-0.86592	0	0	0
14.5	0.7	-0.86592	0	0	0
15.5	0.7	-0.86592	0	0	0
16.5	0.7	-0.86592	0	0	0
17.5	0.7	-0.86592	0	0	0
18.5	0.7	-0.86592	0	0	0
19.5	0.7	-0.86592	0	0	0
20.5	0.7	-0.86592	0	0	0
21.5	0.7	-0.86592	0	0	0
22.5	0.7	-0.86592	0	0	0
23.5	0.7	-0.86592	0	0	0
24.5	0.7	-0.86592	0	0	0
25.5	0.7	-0.86592	0	0	0
26.5	0.7	-0.86592	0	0	0
27.5	0.7	-0.86592	0	0	0
28.5	0.7	-0.86592	0	0	0
29.5	0.7	-0.86592	0	0	0
30.5	0.7	-0.86592	0	0	0
31.5	0.7	-0.86592	0	0	0
32.5	0.7	-0.86592	0	0	0
33.5	0.7	0	0	0	0
34.45	0.7	0	0	0	0
34.5	0.7	0	0	0	0
34.85	0.7	0	0	0	0
35	0.7	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-0.9	0	0	0	0
0.15	-0.9	0	0	0	0
0.5	-0.9	0	0	0	0
0.55	-0.9	0	0	0	0
1.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
2.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
3.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
4.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
5.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
6.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
7.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
8.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
9.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
10.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
11.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
12.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
13.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
14.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
15.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
16.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
17.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
18.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
19.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
20.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
21.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
22.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
23.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
24.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
25.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
26.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
27.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
28.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
29.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
30.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
31.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
32.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
33.5	-0.9	-0.86592	0	0	0
34.45	-0.9	0	0	0	0
34.5	-0.9	0	0	0	0
34.85	-0.9	0	0	0	0
35	-0.9	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	0.9	0	0	0	0
0.15	0.9	0	0	0	0
0.5	0.9	0	0	0	0
0.55	0.9	0	0	0	0
1.5	0.9	-0.86592	0	0	0
2.5	0.9	-0.86592	0	0	0
3.5	0.9	-0.86592	0	0	0
4.5	0.9	-0.86592	0	0	0
5.5	0.9	-0.86592	0	0	0
6.5	0.9	-0.86592	0	0	0
7.5	0.9	-0.86592	0	0	0
8.5	0.9	-0.86592	0	0	0
9.5	0.9	-0.86592	0	0	0
10.5	0.9	-0.86592	0	0	0
11.5	0.9	-0.86592	0	0	0
12.5	0.9	-0.86592	0	0	0
13.5	0.9	-0.86592	0	0	0
14.5	0.9	-0.86592	0	0	0
15.5	0.9	-0.86592	0	0	0
16.5	0.9	-0.86592	0	0	0
17.5	0.9	-0.86592	0	0	0
18.5	0.9	-0.86592	0	0	0
19.5	0.9	-0.86592	0	0	0
20.5	0.9	-0.86592	0	0	0
21.5	0.9	-0.86592	0	0	0
22.5	0.9	-0.86592	0	0	0
23.5	0.9	-0.86592	0	0	0
24.5	0.9	-0.86592	0	0	0
25.5	0.9	-0.86592	0	0	0
26.5	0.9	-0.86592	0	0	0
27.5	0.9	-0.86592	0	0	0
28.5	0.9	-0.86592	0	0	0
29.5	0.9	-0.86592	0	0	0
30.5	0.9	-0.86592	0	0	0
31.5	0.9	-0.86592	0	0	0
32.5	0.9	-0.86592	0	0	0
33.5	0.9	-0.86592	0	0	0
34.45	0.9	0	0	0	0
34.5	0.9	0	0	0	0
34.85	0.9	0	0	0	0
35	0.9	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-1.1	0	0	0	0
0.15	-1.1	0	0	0	0
0.5	-1.1	0	0	0	0
0.55	-1.1	0	0	0	0
1.5	-1.1	0	0	0	0
2.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
3.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
4.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
5.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
6.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
7.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
8.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
9.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
10.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
11.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
12.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
13.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
14.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
15.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
16.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
17.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
18.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
19.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
20.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
21.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
22.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
23.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
24.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
25.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
26.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
27.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
28.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
29.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
30.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
31.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
32.5	-1.1	-0.86592	0	0	0
33.5	-1.1	0	0	0	0
34.45	-1.1	0	0	0	0
34.5	-1.1	0	0	0	0
34.85	-1.1	0	0	0	0
35	-1.1	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	1.1	0	0	0	0
0.15	1.1	0	0	0	0
0.5	1.1	0	0	0	0
0.55	1.1	0	0	0	0
1.5	1.1	0	0	0	0
2.5	1.1	-0.86592	0	0	0
3.5	1.1	-0.86592	0	0	0
4.5	1.1	-0.86592	0	0	0
5.5	1.1	-0.86592	0	0	0
6.5	1.1	-0.86592	0	0	0
7.5	1.1	-0.86592	0	0	0
8.5	1.1	-0.86592	0	0	0
9.5	1.1	-0.86592	0	0	0
10.5	1.1	-0.86592	0	0	0
11.5	1.1	-0.86592	0	0	0
12.5	1.1	-0.86592	0	0	0
13.5	1.1	-0.86592	0	0	0
14.5	1.1	-0.86592	0	0	0
15.5	1.1	-0.86592	0	0	0
16.5	1.1	-0.86592	0	0	0
17.5	1.1	-0.86592	0	0	0
18.5	1.1	-0.86592	0	0	0
19.5	1.1	-0.86592	0	0	0
20.5	1.1	-0.86592	0	0	0
21.5	1.1	-0.86592	0	0	0
22.5	1.1	-0.86592	0	0	0
23.5	1.1	-0.86592	0	0	0
24.5	1.1	-0.86592	0	0	0
25.5	1.1	-0.86592	0	0	0
26.5	1.1	-0.86592	0	0	0
27.5	1.1	-0.86592	0	0	0
28.5	1.1	-0.86592	0	0	0
29.5	1.1	-0.86592	0	0	0
30.5	1.1	-0.86592	0	0	0
31.5	1.1	-0.86592	0	0	0
32.5	1.1	-0.86592	0	0	0
33.5	1.1	0	0	0	0
34.45	1.1	0	0	0	0
34.5	1.1	0	0	0	0
34.85	1.1	0	0	0	0
35	1.1	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-1.3	0	0	0	0
0.15	-1.3	0	0	0	0
0.5	-1.3	0	0	0	0
0.55	-1.3	0	0	0	0
1.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
2.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
3.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
4.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
5.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
6.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
7.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
8.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
9.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
10.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
11.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
12.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
13.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
14.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
15.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
16.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
17.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
18.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
19.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
20.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
21.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
22.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
23.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
24.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
25.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
26.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
27.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
28.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
29.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
30.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
31.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
32.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
33.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
34.45	-1.3	0	0	0	0
34.5	-1.3	0	0	0	0
34.85	-1.3	0	0	0	0
35	-1.3	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	1.3	0	0	0	0
0.15	1.3	0	0	0	0
0.5	1.3	0	0	0	0
0.55	1.3	0	0	0	0
1.5	1.3	-0.86592	0	0	0
2.5	1.3	-0.86592	0	0	0
3.5	1.3	-0.86592	0	0	0
4.5	1.3	-0.86592	0	0	0
5.5	1.3	-0.86592	0	0	0
6.5	1.3	-0.86592	0	0	0
7.5	1.3	-0.86592	0	0	0
8.5	1.3	-0.86592	0	0	0
9.5	1.3	-0.86592	0	0	0
10.5	1.3	-0.86592	0	0	0
11.5	1.3	-0.86592	0	0	0
12.5	1.3	-0.86592	0	0	0
13.5	1.3	-0.86592	0	0	0
14.5	1.3	-0.86592	0	0	0
15.5	1.3	-0.86592	0	0	0
16.5	1.3	-0.86592	0	0	0
17.5	1.3	-0.86592	0	0	0
18.5	1.3	-0.86592	0	0	0
19.5	1.3	-0.86592	0	0	0
20.5	1.3	-0.86592	0	0	0
21.5	1.3	-0.86592	0	0	0
22.5	1.3	-0.86592	0	0	0
23.5	1.3	-0.86592	0	0	0
24.5	1.3	-0.86592	0	0	0
25.5	1.3	-0.86592	0	0	0
26.5	1.3	-0.86592	0	0	0
27.5	1.3	-0.86592	0	0	0
28.5	1.3	-0.86592	0	0	0
29.5	1.3	-0.86592	0	0	0
30.5	1.3	-0.86592	0	0	0
31.5	1.3	-0.86592	0	0	0
32.5	1.3	-0.86592	0	0	0
33.5	1.3	-0.86592	0	0	0
34.45	1.3	0	0	0	0
34.5	1.3	0	0	0	0
34.85	1.3	0	0	0	0
35	1.3	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-1.5	0	0	0	0
0.15	-1.5	0	0	0	0
0.5	-1.5	0	0	0	0
0.55	-1.5	0	0	0	0
1.5	-1.5	0	0	0	0
2.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
3.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
4.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
5.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
6.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
7.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
8.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
9.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
10.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
11.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
12.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
13.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
14.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
15.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
16.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
17.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
18.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
19.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
20.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
21.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
22.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
23.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
24.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
25.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
26.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
27.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
28.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
29.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
30.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
31.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
32.5	-1.5	-0.86592	0	0	0
33.5	-1.5	0	0	0	0
34.45	-1.5	0	0	0	0
34.5	-1.5	0	0	0	0
34.85	-1.5	0	0	0	0
35	-1.5	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	1.5	0	0	0	0
0.15	1.5	0	0	0	0
0.5	1.5	0	0	0	0
0.55	1.5	0	0	0	0
1.5	1.5	0	0	0	0
2.5	1.5	-0.86592	0	0	0
3.5	1.5	-0.86592	0	0	0
4.5	1.5	-0.86592	0	0	0
5.5	1.5	-0.86592	0	0	0
6.5	1.5	-0.86592	0	0	0
7.5	1.5	-0.86592	0	0	0
8.5	1.5	-0.86592	0	0	0
9.5	1.5	-0.86592	0	0	0
10.5	1.5	-0.86592	0	0	0
11.5	1.5	-0.86592	0	0	0
12.5	1.5	-0.86592	0	0	0
13.5	1.5	-0.86592	0	0	0
14.5	1.5	-0.86592	0	0	0
15.5	1.5	-0.86592	0	0	0
16.5	1.5	-0.86592	0	0	0
17.5	1.5	-0.86592	0	0	0
18.5	1.5	-0.86592	0	0	0
19.5	1.5	-0.86592	0	0	0
20.5	1.5	-0.86592	0	0	0
21.5	1.5	-0.86592	0	0	0
22.5	1.5	-0.86592	0	0	0
23.5	1.5	-0.86592	0	0	0
24.5	1.5	-0.86592	0	0	0
25.5	1.5	-0.86592	0	0	0
26.5	1.5	-0.86592	0	0	0
27.5	1.5	-0.86592	0	0	0
28.5	1.5	-0.86592	0	0	0
29.5	1.5	-0.86592	0	0	0
30.5	1.5	-0.86592	0	0	0
31.5	1.5	-0.86592	0	0	0
32.5	1.5	-0.86592	0	0	0
33.5	1.5	0	0	0	0
34.45	1.5	0	0	0	0
34.5	1.5	0	0	0	0
34.85	1.5	0	0	0	0
35	1.5	0	0	0	0

prog [m]	Y11 d	Z11 d	fix	Ry	Rz
0	-1.3	0	0	0	0
0.15	-1.3	0	0	0	0
0.5	-1.3	0	0	0	0
0.55	-1.3	0	0	0	0
1.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
2.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
3.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
4.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
5.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
6.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
7.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
8.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
9.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
10.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
11.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
12.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
13.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
14.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
15.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
16.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
17.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
18.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
19.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
20.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
21.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
22.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
23.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
24.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
25.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
26.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
27.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
28.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
29.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
30.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
31.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
32.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
33.5	-1.3	-0.86592	0	0	0
34.45	-1.3	0	0	0	0
34.5	-1.3	0	0	0	0
34.85	-1.3	0	0	0	0
35	-1.3	0	0	0	0

prog [m]	Y11 s	Z11 s	fix	Ry	Rz
0	1.3	0	0	0	0
0.15	1.3	0	0	0	0
0.5	1.3	0	0	0	0
0.55	1.3	0	0	0	0
1.5	1.3	-0.86592	0	0	0
2.5	1.3	-0.86592	0	0	0
3.5	1.3	-0.86592	0	0	0
4.5	1.3	-0.86592	0	0	0
5.5	1.3	-0.86592	0	0	0
6.5	1.3	-0.86592	0	0	0
7.5	1.3	-0.86592	0	0	0
8.5	1.3	-0.86592	0	0	0
9.5	1.3	-0.86592	0	0	0
10.5	1.3	-0.86592	0	0	0
11.5	1.3	-0.86592	0	0	0
12.5	1.3	-0.86592	0	0	0
13.5	1.3	-0.86592	0	0	0
14.5	1.3	-0.86592	0	0	0
15.5	1.3	-0.86592	0	0	0
16.5	1.3	-0.86592	0	0	0
17.5	1.3	-0.86592	0	0	0
18.5	1.3	-0.86592	0	0	0
19.5	1.3	-0.86592	0	0	0
20.5	1.3	-0.86592	0	0	0
21.5	1.3	-0.86592	0	0	0
22.5	1.3	-0.86592	0	0	0
23.5	1.3	-0.86592	0	0	0
24.5	1.3	-0.86592	0	0	0
25.5	1.3	-0.86592	0	0	0
26.5	1.3	-0.86592	0	0	0
27.5	1.3	-0.86592	0	0	0
28.5	1.3	-0.86592	0	0	0
29.5	1.3	-0.86592	0	0	0
30.5	1.3	-0.86592	0	0	0
31.5	1.3	-0.86592	0	0	0
32.5	1.3	-0.86592	0	0	0
33.5	1.3	-0.86592	0	0	0
34.45	1.3	0	0	0	0
34.5	1.3	0	0	0	0
34.85	1.3	0	0	0	0
35	1.3	0	0	0	0

## Allegato M – Tendon Prestress Load nella situazione futura di restauro

Tendon	Load Case	Type	Jacking	Stress Begin (N/mm <sup>2</sup> )	Stress End (N/mm <sup>2</sup> )	Force Begin (N)	Force End (N)	Grouting	Load Group
cavo1 d	cavo1 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo1 d
cavo1 s	cavo1 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo1 s
cavo10 d	cavo10 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo10 d
cavo10 s	cavo10 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo10 s
cavo11 d	cavo11 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	
cavo11 s	cavo11 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	
cavo12 d	cavo12 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo12 d
cavo12 s	cavo12 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo12 s
cavo13 d	cavo13 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo13 d
cavo13 s	cavo13 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo13 s
cavo14 d	cavo14 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo14 d
cavo14 s	cavo14 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo14 s
cavo2 d	cavo2 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo2 d
cavo2 s	cavo2 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo2 s
cavo3 d	cavo3 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo3 d
cavo3 s	cavo3 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo3 s
cavo4 d	cavo4 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo4 d
cavo4 s	cavo4 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo4 s
cavo5 d	cavo5 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo5 d
cavo5 s	cavo5 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo5 s
cavo6 d	cavo6 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo6 d
cavo6 s	cavo6 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo6 s
cavo7 d	cavo7 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo7 d
cavo7 s	cavo7 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo7 s
cavo8 d	cavo8 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo8 d
cavo8 s	cavo8 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo8 s
cavo9 d	cavo9 d	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo9 d
cavo9 s	cavo9 s	Force	Begin	0	0	1751400	0	2	cavo9 s
r11d_a	r11d_a	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_a
r11d_b	r11d_b	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_b
r11d_c	r11d_c	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_c
r11d_d	r11d_d	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_d
r11d_e	r11d_e	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_e
r11d_f	r11d_f	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_f
r11d_g	r11d_g	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_g
r11d_h	r11d_h	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_h
r11d_i	r11d_i	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11d_i
r11s_a	r11s_a	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_a
r11s_b	r11s_b	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_b
r11s_c	r11s_c	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_c
r11s_d	r11s_d	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_d
r11s_e	r11s_e	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_e
r11s_f	r11s_f	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_f
r11s_g	r11s_g	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_g
r11s_h	r11s_h	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_h
r11s_i	r11s_i	Force	Begin	0	0	206700	0	5	r11s_i

**Allegato N – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave con i  
18 cavi di precompressione esterna nella Combinazione Quasi  
Permanente**

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	t inf	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	t inf	012(last)	2/4	2.80E-01	2.80E-01	-4.40E+00	-4.40E+00
3	Summation	t inf	012(last)	2/4	3.40E-01	3.40E-01	-4.49E+00	-4.49E+00
4	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.45E+00	-4.45E+00	-2.53E+00	-2.53E+00
5	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.56E+00	-4.56E+00	-2.89E+00	-2.89E+00
6	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.73E+00	-4.73E+00	-3.09E+00	-3.09E+00
7	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.14E+00	-5.14E+00	-2.60E+00	-2.60E+00
8	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.51E+00	-5.51E+00	-2.17E+00	-2.17E+00
9	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.84E+00	-5.84E+00	-1.82E+00	-1.82E+00
10	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.13E+00	-6.13E+00	-1.52E+00	-1.52E+00
11	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.37E+00	-6.37E+00	-1.28E+00	-1.28E+00
12	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.57E+00	-6.57E+00	-1.09E+00	-1.09E+00
13	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.74E+00	-6.74E+00	-9.58E-01	-9.58E-01
14	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.90E+00	-6.90E+00	-8.26E-01	-8.26E-01
15	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.00E+00	-7.00E+00	-7.68E-01	-7.68E-01
16	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.05E+00	-7.05E+00	-7.83E-01	-7.83E-01
17	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.11E+00	-7.11E+00	-7.60E-01	-7.60E-01
18	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.15E+00	-7.55E-01	-7.55E-01
19	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.16E+00	-7.16E+00	-7.74E-01	-7.74E-01
20	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.16E+00	-7.16E+00	-8.09E-01	-8.09E-01
21	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.16E+00	-7.16E+00	-8.01E-01	-8.01E-01
22	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.16E+00	-7.16E+00	-7.77E-01	-7.77E-01
23	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.14E+00	-7.14E+00	-7.58E-01	-7.58E-01
24	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.10E+00	-7.10E+00	-7.64E-01	-7.64E-01
25	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.04E+00	-7.04E+00	-7.89E-01	-7.89E-01
26	Summation	t inf	012(last)	2/4	-7.00E+00	-7.00E+00	-7.76E-01	-7.76E-01
27	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.89E+00	-6.89E+00	-8.36E-01	-8.36E-01
28	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.73E+00	-6.73E+00	-9.71E-01	-9.71E-01
29	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.57E+00	-6.57E+00	-1.11E+00	-1.11E+00
30	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.36E+00	-6.36E+00	-1.30E+00	-1.30E+00
31	Summation	t inf	012(last)	2/4	-6.12E+00	-6.12E+00	-1.54E+00	-1.54E+00
32	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.83E+00	-5.83E+00	-1.84E+00	-1.84E+00
33	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.51E+00	-5.51E+00	-2.20E+00	-2.20E+00
34	Summation	t inf	012(last)	2/4	-5.14E+00	-5.14E+00	-2.62E+00	-2.62E+00
35	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.72E+00	-4.72E+00	-3.12E+00	-3.12E+00
36	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.56E+00	-4.56E+00	-2.92E+00	-2.92E+00
37	Summation	t inf	012(last)	2/4	-4.45E+00	-4.45E+00	-2.56E+00	-2.56E+00
38	Summation	t inf	012(last)	2/4	3.42E-01	3.42E-01	-4.51E+00	-4.51E+00
39	Summation	t inf	012(last)	2/4	2.82E-01	2.82E-01	-4.43E+00	-4.43E+00
40	Summation	t inf	012(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

**Allegato O – Tensioni sul calcestruzzo nel modello della trave di futuro restauro nella fase di costruzione al momento dell'applicazione del sistema di rinforzo**

Elem	Load	Stage	Step	Part	Cb1(-y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb2(+y+z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb3(+y-z) (N/mm <sup>2</sup> )	Cb4(-y-z) (N/mm <sup>2</sup> )
1	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04
2	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	2.94E-01	2.94E-01	-4.62E+00	-4.62E+00
3	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	3.57E-01	3.57E-01	-4.71E+00	-4.71E+00
4	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-4.64E+00	-4.64E+00	-2.70E+00	-2.70E+00
5	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.05E+00	-5.05E+00	-2.20E+00	-2.20E+00
6	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.45E+00	-5.45E+00	-1.73E+00	-1.73E+00
7	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.82E+00	-5.82E+00	-1.32E+00	-1.32E+00
8	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.14E+00	-6.14E+00	-9.66E-01	-9.66E-01
9	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.42E+00	-6.42E+00	-6.84E-01	-6.84E-01
10	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.66E+00	-6.66E+00	-4.53E-01	-4.53E-01
11	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.86E+00	-6.86E+00	-2.80E-01	-2.80E-01
12	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.03E+00	-7.03E+00	-1.48E-01	-1.48E-01
13	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.15E+00	-7.15E+00	-6.18E-02	-6.18E-02
14	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.28E+00	-7.28E+00	2.82E-02	2.82E-02
15	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.36E+00	-7.36E+00	4.87E-02	4.87E-02
16	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.38E+00	-7.38E+00	-1.19E-03	-1.19E-03
17	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.42E+00	-7.42E+00	-2.65E-03	-2.65E-03
18	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.45E+00	-7.45E+00	-1.68E-02	-1.68E-02
19	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.46E+00	-7.46E+00	-4.95E-02	-4.95E-02
20	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.45E+00	-7.45E+00	-9.26E-02	-9.26E-02
21	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.45E+00	-7.45E+00	-8.35E-02	-8.35E-02
22	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.45E+00	-7.45E+00	-5.24E-02	-5.24E-02
23	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.45E+00	-7.45E+00	-2.04E-02	-2.04E-02
24	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.42E+00	-7.42E+00	-7.42E-03	-7.42E-03
25	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.38E+00	-7.38E+00	-7.58E-03	-7.58E-03
26	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.36E+00	-7.36E+00	4.03E-02	4.03E-02
27	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.28E+00	-7.28E+00	1.79E-02	1.79E-02
28	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.15E+00	-7.15E+00	-7.55E-02	-7.55E-02
29	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-7.02E+00	-7.02E+00	-1.64E-01	-1.64E-01
30	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.85E+00	-6.85E+00	-2.99E-01	-2.99E-01
31	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.65E+00	-6.65E+00	-4.74E-01	-4.74E-01
32	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.41E+00	-6.41E+00	-7.07E-01	-7.07E-01
33	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-6.13E+00	-6.13E+00	-9.92E-01	-9.92E-01
34	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.81E+00	-5.81E+00	-1.34E+00	-1.34E+00
35	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.44E+00	-5.44E+00	-1.76E+00	-1.76E+00
36	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-5.04E+00	-5.04E+00	-2.23E+00	-2.23E+00
37	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	-4.63E+00	-4.63E+00	-2.73E+00	-2.73E+00
38	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	3.59E-01	3.59E-01	-4.74E+00	-4.74E+00
39	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	2.96E-01	2.96E-01	-4.65E+00	-4.65E+00
40	Summation	3 anni (2014-2017)	002(last)	2/4	2.69E-04	2.69E-04	-3.66E-04	-3.66E-04

## **Allegato P - Computo metrico estimativo di massima**

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							
	<b>LAVORI A MISURA</b>							
	<b>DEMOLIZIONE ED ASPORTAZIONE DEL CALCESTRUZZO AMMALORATO (Cat 1)</b>							
1 A.03.025.2.a	<b>IDRODEMOLIZIONE E ASPORTAZIONE CORTICALE DI CONGLOMERATO ALL'INTRADOSSO IMPALCATI - PER SPESSORE MEDIO FINO A 3 CM</b> idrodemolizione su intradossi di impalcati di opere d'arte o su superfici verticali di pile e spalle per il risanamento delle stesse, eseguite con idrodemolitrici capaci di getti d'acqua fino a pressione in uscita di 1500 atm. Adottando tutte le precauzioni necessarie ad evitare danni alle strutture. Compresa la eventuale spazzolatura meccanica o sabbiatura dei ferri di armatura ed una energica soffiatura con aria compressa, l'eventuale scalpellatura di rifinitura, mediante demolitori leggeri, l'approvvigionamento dell'acqua, il caricamento ed il trasporto a discarica del materiale di rifiuto. Esclusi dal prezzo eventuali ponteggi ed impalcature o attrezzature mobili necessari per l'esecuzione e l'accesso al posto di lavoro <b>- PER SPESSORE MEDIO FINO A 3 CM</b> - Si ipotizza uno spessore medio di demolizione su tutta la campata pari a 5cm		33,90	4,500		152,55		
	SOMMANO mq					152,55	33,63	5'130,26
2 A.03.025.2.b	<b>IDRODEMOLIZIONE E ASPORTAZIONE CORTICALE DI CONGLOMERATO ALL'INTRADOSSO IMPALCATI - PER SPESSORE MEDIO FINO A 3 CM</b> idrodemolizione su intradossi di impalcati di opere d'arte o su superfici verticali di pile e spalle per il risanamento delle stesse, eseguite con idrodemolitrici capaci di getti d'acqua fino a pressione in uscita di 1500 atm. Adottando tutte le precauzioni necessarie ad evitare danni alle strutture. Compresa la eventuale spazzolatura meccanica o sabbiatura dei ferri di armatura ed una energica soffiatura con aria compressa, l'eventuale scalpellatura di rifinitura, mediante demolitori leggeri, l'approvvigionamento dell'acqua, il caricamento ed il trasporto a discarica del materiale di rifiuto. Esclusi dal prezzo eventuali ponteggi ed impalcature o attrezzature mobili necessari per l'esecuzione e l'accesso al posto di lavoro <b>- PER SPESSORE MEDIO SUPERIORE A 3 CM E PER OGNI CM IN PIÙ</b> - Si ipotizza uno spessore medio di demolizione su tutta la campata pari a 5cm		33,90	4,500	2,000	305,10		
	SOMMANO mqxcm					305,10	10,35	3'157,79
	<b>A RIPORTARE</b>							8'288,05

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							8'288,05
3 B.09.020.2	<b>PASSIVAZIONE DELLE ARMATURE ED INTERVENTI DI RIPRISTINO DEL COPRIFERRO (Cat 2)</b>  <b>PASSIVAZIONE DEI FERRI DI ARMATURA</b> eseguita mediante applicazione di malta cementizia monocomponente penetrabile a base di leganti idraulici, polveri silicee, inibitori di corrosione e dispersione di polimeri acrilici		33,90	4,500		152,55		
	SOMMANO mq					152,55	3,21	489,69
4 B.09.220.2.a	<b>MEDIO - RISANAMENTO PER SPESSORI D'INTERVENTO DA 10 A 50 MM</b> <b>MALTE PREMISCELATE</b> <b>TIXOTROPICA FIBRORINFORZATA CON FIBRE INORGANICHE</b> fornitura e posa in opera di malta ad espansione contrastata con maturazione in aria, contenente fibre sintetiche in poliacrilonitrile per la ricostruzione di strutture in calcestruzzo degradate. L'applicazione della malta dovrà essere effettuata previa adeguata preparazione del supporto (da computarsi a parte). Il prodotto dovrà essere applicato su sottofondo pulito e saturo di acqua, in uno spessore compreso tra 10 e 50 mm per strato. Il prodotto dovrà rispondere alle seguenti caratteristiche prestazionali: - Resistenza a compressione a 28 gg $\geq 55$ MPa (UNI EN 12190); - Resistenza a compressione a 7 gg $\geq 40$ MPa (UNI EN 12190); - Resistenza a flessione a 28 gg $\geq 7$ MPa (UNI EN 196/1); - Resistenza a flessione a 7 gg $\geq 6$ MPa (UNI EN 196/1); - Modulo elastico a compressione a 28 gg tra 26 GPa ÷ 30 GPa (UNI EN 13412); - Aderenza al cls (UNI EN 1542) $\geq 2$ MPa; - Compatibilità termica misurata come adesione (UNI EN 1542), dopo 50 cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti, (UNI EN 13687) $\geq 2$ MPa; - Assorbimento capillare (UNI EN 13057) $\leq 0,3$ kg • m-2 • h-0,5; - Espansione contrastata con stagionatura in aria ad 1 giorno (UNI 8147) $\geq 0,04\%$ . Il prodotto deve essere marcato CE ai sensi della UNI EN 1504-3 con il sistema di Valutazione e Verifica della Prestazione 2+ tra quelli di attestazione previsti dal Regolamento U.E. 305/11. Compresi e compensati nel prezzo per dare il lavoro finito a regola d'arte <b>- FINO AD UNO SPESSORE MAX DI CM 2</b>		33,90	4,500		152,55		
	SOMMANO mq					152,55	68,74	10'486,29
5	<b>MEDIO - RISANAMENTO PER SPESSORI D'INTERVENTO DA 10 A 50 MM</b>							
	<b>A RIPORTARE</b>							19'264,03

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							19'264,03
B.09.220.2.b	<b>MALTE PREMISCELATE TIXOTROPICA FIBRORINFORZATA CON FIBRE INORGANICHE</b> fornitura e posa in opera di malta ad espansione contrastata con maturazione in aria, contenente fibre sintetiche in poliacrilonitrile per la ricostruzione di strutture in calcestruzzo degradate. L'applicazione della malta dovrà essere effettuata previa adeguata preparazione del supporto (da computarsi a parte). Il prodotto dovrà essere applicato su sottofondo pulito e saturo di acqua, in uno spessore compreso tra 10 e 50 mm per strato. Il prodotto dovrà rispondere alle seguenti caratteristiche prestazionali: - Resistenza a compressione a 28 gg $\geq 55$ MPa (UNI EN 12190); - Resistenza a compressione a 7 gg $\geq 40$ MPa (UNI EN 12190); - Resistenza a flessione a 28 gg $\geq 7$ MPa (UNI EN 196/1); - Resistenza a flessione a 7 gg $\geq 6$ MPa (UNI EN 196/1); - Modulo elastico a compressione a 28 gg tra 26 GPa ÷ 30 GPa (UNI EN 13412); - Aderenza al cls (UNI EN 1542) $\geq 2$ MPa; - Compatibilità termica misurata come adesione (UNI EN 1542), dopo 50 cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti, (UNI EN 13687) $\geq 2$ MPa; - Assorbimento capillare (UNI EN 13057) $\leq 0,3$ kg • m-2 • h-0,5; - Espansione contrastata con stagionatura in aria ad 1 giorno (UNI 8147) $\geq 0,04\%$ . Il prodotto deve essere marcato CE ai sensi della UNI EN 1504-3 con il sistema di Valutazione e Verifica della Prestazione 2+ tra quelli di attestazione previsti dal Regolamento U.E. 305/11. Compresi e compensati nel prezzo per dare il lavoro finito a regola d'arte - <b>SOVRAPPREZZO PER OGNI CENTIMETRO IN PIÙ</b>							
	SOMMANO mqxcem		33,90	4,500	3,000	457,65		
						457,65	30,52	13'967,48
	<b>A RIPORTARE</b>							33'231,51

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							33'231,51
6 B.09.400.1.1. b	<p style="text-align: center;"><b>INTERVENTI DI RINFORZO CON LASTRE PULTRUSE CFRP PRETESE (Cat 3)</b></p> <p><b>RINFORZI STRUTTURALI</b> consolidamento di elementi strutturali in c.a. e c.a.p. mediante sistemi compositi di rinforzo, costituiti da una matrice polimerica e filamenti in fibra di carbonio FRP (fiber reinforced polymers) nelle forme di tessuti unidirezionali, lamine e/o barre pultruse. Le superfici sulle quali applicare i sistemi compositi in FRP dovranno essere esenti da parti incoerenti, planari perfettamente asciutte e pulite, previa preparazione del supporto con idrosabbatura, da pagarsi a parte. Il prezzo comprende e compensa ogni onere per dare il lavoro finito a regola d'arte compreso: - Arrotondamento spigoli; - Rettifica di eventuali imperfezioni superficiali del cls; - Rasatura con pasta epossidica (sp. max 5 mm); - Pulizia della superficie di supporto. Sono esclusi eventuali ripristini del calcestruzzo ammalorato e i ponteggi <b>FIBRE DI CARBONIO IN LAMINE</b> fornitura e posa in opera, con incollaggio dei sistemi in FRP attraverso l'uso di adesivo epossidico bicomponente che risponde alle seguenti caratteristiche prestazionali: - Resistenza a trazione per flessione - secondo ASTM D790 - a 7 gg <math>\geq 20</math> MPa oppure secondo UNI EN ISO 178 - a 7 gg <math>\geq 30</math> MPa; - Adesione al cls a 7 gg <math>\geq 3,5</math> MPa - rottura del cls (UNI EN 1542) <b>MODULO ELASTICO <math>\geq 150</math> GPA</b> le lamine dovranno rispondere alle seguenti caratteristiche prestazionali: - Resistenza caratteristica a trazione <math>F_{tk} \geq 3000</math> MPa (ASTM D3039); - Modulo elastico medio a trazione <math>\geq 150</math> GPa (ASTM D3039) - Deformazione ultima media a trazione (ASTM D3039): 1,6% ÷ 2,0% <b>- SEZIONE RESISTENTE <math>\geq 140</math> MMQ</b></p>							
	SOMMANO m	10,00 8,00	32,00 30,00			320,00 240,00 <hr/> 560,00	129,23	72'368,80
7 B.02.142	<p><b>TESTATE DI ANCORAGGIO PER TIRANTI DI QUALUNQUE TENSIONE</b> compreso l'allettamento con malta o l'inghisaggio nel foro ed ogni altro onere, anche di brevetto, necessario per dare il prodotto finito a regola d'arte. Compresa la fornitura e la posa in opera</p>					36,00 <hr/> 36,00	12,99	467,64
	<b>A RIPIORTARE</b>							106'067,95

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	R I P O R T O							106'067,95
8 NP. 01	ONERI PER INTERVENTI TECNICI DI MESSA IN TENSIONE DELLE LAMINE ANCHE PER STEP SUCCESSIVI					18,00		
	SOMMANO cadauno					18,00	150,00	2'700,00
	A R I P O R T A R E							108'767,95

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							108'767,95
9 B.09.105.1.b	<p style="text-align: center;"><b>INTERVENTI DI PROTEZIONE DEI SISTEMI DI RINFORZO (Cat 4)</b></p> <p><b>PROTEZIONI DI STRUTTURE VERNICIATURA CLS SISTEMA DI PROTEZIONE DEL CLS CON UNO STRATO DI PROTETTIVO ELASTICO</b> il prodotto deve essere marcato CE ai sensi della UNI EN 1504-2 con il sistema di Valutazione e Verifica della Prestazione 2+ tra quelli di attestazione previsti dal Regolamento U.E. 305/11 - <b>MONOCOMPONENTE A BASE DI RESINA ACRILICA ELASTOMERICA</b> fornitura e posa in opera di rivestimento elastico, per la protezione di supporti in calcestruzzo dalla penetrazione di agenti aggressivi presenti nella atmosfera. L'applicazione dovrà avvenire in due strati tramite pennello, rullo o spruzzo previa applicazione di relativo primer. L'applicazione dovrà essere effettuata, previa preparazione del supporto in calcestruzzo, in uno spessore secco non inferiore a 400 µm, previa applicazione di primer monocomponente a base di resine acriliche, in uno spessore secco minimo di 50 µm al fine di regolare l'assorbimento del supporto e migliorare l'adesione del rivestimento. Sono compensati gli oneri del supporto con idrosabbatura. La finitura inoltre dovrà avere le seguenti caratteristiche: - Aderenza al cls (UNI EN 1542) ≥ 1 MPa; - Temperatura di applicazione +10°C ÷ +40°C; - Permeabilità CO2 ≥ 130 m (UNI EN 1062-6); - Permeabilità al vapore acqueo ≤ 0,5 (UNI EN 7783); - Permeabilità all'acqua (UNI EN 1062-3) ≤ 0,01 kg • m-2 • h-0,5; - Compatibilità termica (cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti) misurata come adesione, EN 1542, dopo 50 cicli conforme aderenza ≥ 0,8 MPa. Compresi e compensati nel prezzo ogni altra opera per dare il lavoro finito a perfetta regola d'arte</p> <p style="text-align: right;">SOMMANO mq</p>		33,90	4,500		152,55		
						152,55	19,43	2'964,05
10 B.09.125.b	<p><b>PROTEZIONE DI SUPERFICI IN CALCESTRUZZO NUOVO O RIPRISTINATO</b> con ciclo ad alta durabilità con finiture fluorurate in tinta eventualmente con caratteristiche antigraffiti. Ciclo protettivo ad alta durabilità con strato di finitura costituito da pittura poliuretanicca fluorurata bicomponente ad alto tenore di fluoro e basso contenuto di sostanze organiche volatili. Nel caso di calcestruzzi ammalorati con zone di distacco e presenza di ferri con evidenti fenomeni di degrado, dovranno essere eseguite tutte le</p>							
	<b>A RIPORTARE</b>							111'732,00

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	R I P O R T O							111'732,00
	<p>operazioni di ripristino da pagarsi a parte.  Il ciclo da applicare sul supporto nuovo o risanato, dovrà essere il seguente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. idrolavaggio a media pressione (&gt; 25 MP) per rimuovere sporco ed eventuali residui di pitture incoerenti;</li> <li>2. applicazione a spruzzo airless, irroratrice o rullo, di primer silossanico antisale; il prodotto dovrà essere formulato con polimeri silossanici e microdispersioni acriliche ad alta penetrazione, subito dopo l'applicazione il supporto deve risultare idrorepellente (effetto perlante);</li> <li>3. applicazione a spruzzo airless o rullo, su tutta la superficie di pittura di fondo bicomponente acrilpoliuretano all'acqua; spessore minimo &gt; 40 micron DFT;</li> <li>4. applicazione a spruzzo airless o rullo, su tutta la superficie di pittura di finitura poliuretano fluorurata bicomponente a solvente; spessore minimo &gt; 40 micron DFT.</li> </ol> <p>Oltre ai valori specificati i rivestimenti devono soddisfare i requisiti previsti dalla norma UNI EN 1504-2 e dotati di marcatura CE, con livello di valutazione e verifica della Costanza della Prestazione 2+ tra quelli di attestazione previsti dal regolamento U.E. n° 305/2011.</p> <p>Controlli in corso d'opera:</p> <p>a) prima della verniciatura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica dell'alcalinità superficiale del supporto: pH &lt; 12; il supporto deve essere asciutto;</li> </ul> <p>b) durante la verniciatura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- misurare e registrare l'umidità dell'ambiente, la temperatura dell'aria e del supporto e lo spessore umido di pittura applicata;</li> </ul> <p>c) controlli finali:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- adesione &gt; 0,8 MPa secondo UNI EN 1542 (dopo 15 giorni dall'applicazione) con rottura del supporto;</li> <li>- rottura del supporto.</li> </ul> <p>Il prodotto deve essere marcato CE ai sensi della UNI EN 1504-2 con il sistema di Valutazione e Verifica della Prestazione 2+ tra quelli di attestazione previsti dal Regolamento U.E. 305/11.</p> <p>Esclusi i ponteggi ma compreso ogni altro onere per dare il lavoro finito a perfetta regola d'arte e secondo le disposizioni della D.L.</p> <p><b>- FINITURA TRASPARENTE OPACA</b>  colore trasparente opaco.</p> <p>Il ciclo protettivo dovrà rispondere alle seguenti caratteristiche prestazionali:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permeabilità vapor d'acqua Sd &lt; 3 m (UNI EN 7783);</li> <li>- Permeabilità acqua liquida <math>W \leq 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}</math> (UNI EN 1062-3);</li> <li>- Permeabilità alla CO2 Sd &gt; 300 m (UNI EN 1062-6);</li> <li>- Aderenza al cls <math>\geq 0,8 \text{ MPa}</math> (UNI EN 1542).</li> </ul> <p>Temperatura di applicazione: come da scheda tecnica.  Spessore: min &gt; 70 micron.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compatibilità termica misurata come adesione (UNI EN 1542), dopo 50 cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti, (UNI EN 13687) adesione <math>\geq 0,8 \text{ MPa}</math></li> </ul>							
	SOMMANO mq		33,90	4,500		152,55		
						<u>152,55</u>	28,02	4'274,45
	A R I P O R T A R E							116'006,45

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<b>RIPORTO</b>							116'006,45
11 NP. 02	<b>ONERI DELLA SICUREZZA (Cat 5)</b>  <b>ONERI DELLA SICUREZZA</b>					1,00		
	SOMMANO a corpo					1,00	11'600,00	11'600,00
	<b>Parziale LAVORI A MISURA euro</b>							127'606,45
	<b>T O T A L E euro</b>							127'606,45
	<b>A R I P O R T A R E</b>							

COMMITTENTE:

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	IMPORTI
		TOTALE
	R I P O R T O	
	<u>Riepilogo CATEGORIE</u>	
001	DEMOLIZIONE ED ASPORTAZIONE DEL CALCESTRUZZO AMMALORATO	8'288,05
002	PASSIVAZIONE DELLE ARMATURE ED INTERVENTI DI RIPRISTINO DEL COPRIFERRO	24'943,46
003	INTERVENTI DI RINFORZO CON LASTRE PULTRUSE CFRP PRETESE	75'536,44
004	INTERVENTI DI PROTEZIONE DEI SISTEMI DI RINFORZO	7'238,50
005	ONERI DELLA SICUREZZA	11'600,00
	<b>Totale CATEGORIE euro</b>	<b>127'606,45</b>
	Data, 01/12/2017	
	A R I P O R T A R E	

COMMITTENTE:

## BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN 1990 Eurocodice – Criteri generali di progettazione strutturale
- [2] UNI EN 1992-1.1 Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo
- [3] Model Code 2010
- [4] D.M. 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni
- [5] Circolare 2/02/2009 n° 617 – Istruzioni per l'applicazione delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- [6] 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
- [7] Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 9/07/2015 n° 220 - Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti
- [8] Pier Giorgio Debernardi - Strutture di calcestruzzo armato precompresso. Con riferimento agli Eurocodici
- [9] Salvatore Lombardo - Valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in cemento armato
- [10] E. Siviero con S. Casucci e A. Cecchi - Il ponte e l'architettura
- [11] Nanni, A., "FRP Reinforcement for Bridge Structures," Proceedings, Structural Engineering Conference, The University of Kansas, Lawrence, KS, March 16, 2000, 5 pp.

[12] M. Lenzi, R. Osti, P. Campana - Precompressione esterna impressa con lamine in fibra di carbonio

[13] Brochure della società svizzera StressHead AG - StressHead-CarboStress post-tensioning system

[14] Brochure della società Sika - Sistemi Sika per rinforzi strutturali

[15] Schede Tecniche della società Sika - Sistema Sika CarboDur

[16] Elenco Prezzi ANAS 2016