

I QUADERNI TECNICI

PER LA SALVAGUARDIA
DELLE INFRASTRUTTURE

NORME TECNICHE

MANUTENZIONE
DEI PONTI IN ACCIAIO

SOSTITUZIONE DI
IMPALCATI ESISTENTI
IN C.A.P. CON NUOVI MANUFATTI
IN CARPENTERIA METALLICA

VOLUME VII



IN COLLABORAZIONE CON

I QUADERNI TECNICI

PER LA SALVAGUARDIA
DELLE INFRASTRUTTURE

VOLUME VII

Volume VII

NORME TECNICHE

MANUTENZIONE DEI PONTI IN ACCIAIO

SOSTITUZIONE DI IMPALCATI ESISTENTI IN C.A.P. CON NUOVI MANUFATTI IN CARPENTERIA METALLICA

PARTE INTEGRANTE DEL QUADERNO TECNICO,
21 TAVOLE DI PROGETTO RELATIVE A DIVERSE SOLUZIONI
DI CAMPATE IN CARPENTERIA METALLICA
SCARICABILI DA www.stradeanas.it E www.promozioneacciaio.it

IN COLLABORAZIONE CON

Indice Volume VII

Prefazione.....	9
1 Introduzione	11
2 I ponti e i viadotti esistenti ANAS	12
3 Manutenzione dei ponti in acciaio esistenti	15
3.1 Censimento e ispezioni visive	15
3.2 Valutazione dello stato di conservazione della struttura	16
3.2.1 Cenni sull'adeguamento sismico	17
4 Sostituzione di impalcati esistenti in c.a.p./c.a. con strutture in carpenteria metallica	18
4.1 Progettazione e dimensionamento per campate tipo standard dei ponti ANAS	19
4.1.1 Dati Generali	19
4.1.2 Caratteristiche geometriche della carreggiata	20
4.1.3 Ipotesi di carico	20
4.2 Esempi di soluzione multi-trave con profilo laminato	21
4.2.1 Lunghezza di campata tipo: 25m	22
4.2.1.1 25m – Isostatico	
Soluzione multi-trave con profili laminati accostati (chiusi)	22
4.2.1.2 25m – Isostatico	
Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati	24
4.2.2 Lunghezza di campata tipo: 35m – Isostatico – Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati	25
4.2.3 Lunghezza di campata tipo: 25m - 5 campate continue	27
4.2.4 Esempi realizzativi	29
4.3 Esempi di soluzione con travi a cassone chiuso	35
4.3.1 Lunghezza di campata tipo: 35m	35
4.3.2 Lunghezza di campata tipo: 35m - 5 campate continue	39
4.3.3 Esempi realizzativi	43
4.4 Esempi di soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata	44
4.4.1 Lunghezza di campata tipo: 25m	44
4.4.2 Lunghezza di campata tipo: 35m	48

Indice Volume VII

4.4.3	Lunghezza di campata tipo: 25m - 5 campate continue	51
4.4.4	Esempi realizzativi	53
4.5	Esempi di soluzione a travata reticolare con profili tubolari a sezione circolare	55
4.5.1	Lunghezza di campata tipo: 25m	55
4.5.2	Lunghezza di campata tipo: 35m	58
4.5.3	Lunghezza di campata tipo: 25m - 3 campate continue	63
4.5.4	Esempi realizzativi	67
4.6	Scelta della soluzione più conveniente per le solette negli impalcati a sezione mista acciaio-cls	71
4.6.1	Soluzioni Alternative per le Solette	71
4.7	Lavorazioni preliminari sul cantiere per la sostituzione con una campata in acciaio, a seguito dello smantellamento di una campata di un ponte esistente in c.a.	74
4.8	Allargamenti di ponti in c.a.p. con strutture in acciaio	76
5	Giunti e appoggi	78
5.1	Tipologie di sistema di vincolo	78
5.2	Tipologie di appoggi per sistema di vincolo rigido	79
5.3	Tipologie di appoggi per sistema di vincolo cedevole	81
5.4	Isolatori sismici	82
5.5	Dissipatori sismici	83
5.6	Ritegni sismici	85
6	I prodotti e la durabilità (Materiali e Trattamenti protettivi per i ponti in acciaio)	86
6.1	Materiali.....	86
6.1.1	Acciai non legati per impieghi strutturali.....	91
6.1.2	Acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine	92
6.1.3	Acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione	94
6.1.4	Acciai per profilati cavi finiti a caldo e formati a freddo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali	94
6.1.5	Acciaio inox e duplex	98
6.1.6	Collegamenti	98

Indice Volume VII

6.2	Trattamenti protettivi e materiali autopassivanti	100
6.2.1	Identificazione classe di corrosività	101
6.2.2	Durabilità	104
6.2.3	La protezione e la durabilità degli acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione	105
6.2.4	Zincatura	109
6.2.5	Verniciatura	120
6.2.6	Cicli combinati zincatura+verniciatura	125
6.3	Tabella riassuntiva per soluzione di impalcato e rivestimento protettivo	125
7	Tempi di realizzazione, gestione del cantiere e manutenzione dei ponti in acciaio	126
7.1	Reperibilità dei prodotti in acciaio per ponti	126
7.2	Tempi di realizzazione dei trattamenti	126
7.3	Tempi di realizzazione dei manufatti in officina	126
7.4	Varo e montaggio delle campate	126
7.5	Piano di Manutenzione dei ponti in acciaio	129
8	Sostenibilità	130
8.1	Il riciclo dell'acciaio	130
8.2	Normativa vigente	131
8.3	Certificazioni ambientali	131
8.4	Life Cycle Assessment (LCA).....	132
8.4.1	Esempi di LCA per soluzioni di campata in acciaio	133
8.4.2	Impatto ambientale: confronto dei differenti sistemi anticorrosivi	134
	Tavole allegate.....	135
	Riferimenti bibliografici	161

Prefazione

Il presente volume dei quaderni tecnici conferma l'impegno di ANAS nell'incrementare l'efficienza e l'efficacia degli interventi di manutenzione programmata sulla rete in gestione diretta, proseguendo con le attività di standardizzazione negli interventi su ponti e viadotti, con l'obiettivo di uniformare in maniera sempre maggiore la progettazione degli interventi di risanamento sviluppando ed ampliando la gamma degli interventi previsti che, nel presente Quaderno Tecnico, riguardano le soluzioni in carpenteria metallica.

Il volume si presenta come un unico quaderno sviluppato con la collaborazione di Fondazione Promozione Acciaio, Ente culturale che persegue progetti atti a valorizzare gli aspetti progettuali e tecnologico-costruttivi che, attraverso l'utilizzo dell'acciaio, contribuiscono al progressivo innalzamento della qualità e della sicurezza del prodotto infrastrutturale. Fondazione Promozione Acciaio ha messo a disposizione il proprio know-how per la realizzazione della presente pubblicazione tecnica rivolta ai casi in cui le condizioni del manufatto ammalorato siano tali che si debba ricorrere alla sostituzione dell'intera opera o di parte di essa con strutture in carpenteria metallica.

Con il presente Quaderno sono approfonditi alcuni degli aspetti già trattati nei Quaderni Tecnici n. 7 e n. 8 e n. 16 e vengono presentati degli esempi di soluzioni standard in carpenteria metallica in sostituzione di impalcati esistenti in c.a. e c.a.p. giunti a fine vita.

Vengono evidenziate le caratteristiche proprie della realizzazione di un impalcato in carpenteria metallica con particolare riguardo ai tempi, alla reperibilità dei prodotti ed alle problematiche tipiche del cantiere in caso di sostituzione di campate di ponti esistenti, con un approfondimento generale sui materiali, i giunti e gli appoggi, la durabilità ed i trattamenti protettivi, il piano di manutenzione e la sostenibilità dei ponti in carpenteria metallica.

Si auspica che il presente manuale possa risultare utile ai tecnici impegnati nella progettazione, direzione dei lavori e collaudo degli interventi di manutenzione programmata di opere d'arte in gestione, considerando che il volume è stato redatto per costituire una linea guida per Anas e per i suoi progettisti, con l'obiettivo di contribuire al miglioramento della capacità innovativa in termini di soluzioni costruttive.

Per la realizzazione e la pubblicazione del presente volume si ringrazia l'Amministratore Delegato, Ing. Massimo Simonini, che ha avviato il presente lavoro quando era a capo dell'Ufficio Ponti, Viadotti e Gallerie, l'Ing. Domenico Cimino che ne ha seguito lo sviluppo iniziale e l'Ing. Paolo Mannella attuale Responsabile dell'Ufficio Ponti, Viadotti e Gallerie della DOCT che con l'Ing. Gino Mosaici - Responsabile dei monitoraggi strutturali - ha portato a compimento l'attività.

Il Direttore Operation e Coordinamento Territoriale
Ing. Matteo Castiglioni

1. Introduzione

Il presente documento prosegue nello sforzo di ANAS di incrementare l'efficienza e l'efficacia degli interventi di manutenzione sulla propria rete in gestione, lavoro intrapreso riguardo la standardizzazione dei lavori di manutenzione e il recupero delle opere d'arte.

Il quaderno n. 16 ha trattato la manutenzione e gli interventi di ripristino degli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo, realizzati mediante soletta superiore in calcestruzzo e struttura in carpenteria metallica. All'interno del quaderno citato è possibile trovare una descrizione sommaria delle tipologie di impalcato in carpenteria metallica, delle patologie e degli esempi di danneggiamento corredata da una sintesi degli interventi di ripristino per le strutture in acciaio.

Questo documento intende affrontare gli interventi di manutenzione straordinaria delle opere esistenti in calcestruzzo o c.a.p, nei casi in cui le condizioni del manufatto ammalorato siano tali che si debba ricorrere alla sostituzione dell'intera struttura o parte di essa, valutando la sostituzione con elementi in carpenteria metallica che presentano minore massa e pertanto conferiscono migliore comportamento in condizioni sismiche del ponte/viadotto trasferendo minori sollecitazioni alle sottostrutture.

Nei primi capitoli saranno approfonditi alcuni degli aspetti citati nel Quaderno Tecnico n. 16, in particolare per quanto riguarda le tipologie dei ponti esistenti in acciaio, il censimento, la valutazione e l'ispezione.

Saranno fornite indicazioni sugli appoggi e sui giunti di dilatazione già trattati rispettivamente nei quaderni n. 7 e n. 8 pubblicati da ANAS.

Nei capitoli successivi verranno presentati degli esempi di soluzioni "standard" per le luci maggiormente ricorrenti dei ponti ANAS esistenti in c.a. e c.a.p: da 25m a 35m.

Vengono analizzate diverse tipologie di impalcati in carpenteria metallica:

- bi-trave e multitrave con profili laminati;
- bi-trave con profili saldati;
- trave a cassone;
- trave reticolare;

Viene riportata, infine, un'analisi delle diverse tipologie di soletta: in lastre prefabbricate in c.a., in calcestruzzo e con lastra ortotropa in acciaio ed un accenno agli allargamenti dei ponti esistenti con elementi in carpenteria metallica. L'analisi di più soluzioni con identiche luci standard ha permesso di valutare e confrontare, per ogni tipologia di impalcato, le proprie caratteristiche corredate dai vantaggi e/o svantaggi.

Il documento continua con un approfondimento sui materiali, la durabilità ed i trattamenti protettivi.

Nei capitoli finali vengono affrontate tematiche proprie della realizzazione di un impalcato in carpenteria metallica: tempi, reperibilità dei prodotti e problematiche tipiche del cantiere in caso di sostituzione di campane di ponti esistenti.

Particolare attenzione viene data infine al piano di manutenzione dei ponti in acciaio, inserendo così un altro tassello nell'obiettivo di ANAS di standardizzare le attività manutentive ricorrenti e gli interventi di manutenzione programmata delle opere d'arte.

2. I ponti e i viadotti esistenti ANAS

ANAS ha in gestione diretta oltre 30.000 km di strade ed autostrade su cui insistono circa 1.900 gallerie e più di 14.000 ponti e viadotti. La larghezza tipica degli impalcati stradali della rete ANAS di strade extraurbane secondarie (categoria C) è compresa tra circa 11.50 m e 12.70 m per strade di tipo C1, per strade di tipo C2 invece la larghezza varia da un minimo di 10.50 m ad un massimo di circa 11.70 m, mentre la corsia singola ha una larghezza che varia dai 5m ai 6m. Le banchine a destra della corsia per ogni senso di marcia sono larghe 1.50 m per la tipologia C1 diminuendo ad 1.25 m per la categoria C2.

Le due tipologie di Strade extraurbane si differenziano per il fatto che le C1 sono strade extraurbane secondarie a traffico sostenuto mentre le C2 sono a traffico limitato.

La velocità minima imposta su tali strade è 60km/h e la massima è 100km/h.

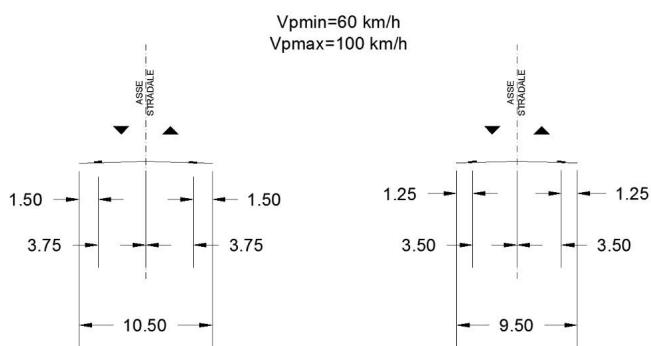


Figura 2.1 – Dimensioni carreggiate di strade extraurbane secondarie (categoria C)

Larghezza impalcati	Tipo di strada	
min	max	
m	m	
11,50	12,70	C1 / IV tipo
10,50	11,70	C2 / V tipo
5,00	6,00	Monocorsia/rampa

Tabella 2.1 – Larghezza impalcati per ogni tipo di strada

Non verranno analizzate, invece, le opere d'arte autostradali (categoria A) di larghezza complessiva del piano stradale a quattro corsie di 24 m.

Il patrimonio dei ponti/viadotti ANAS è caratterizzato da impalcati in calcestruzzo armato, prefabbricato o gettato in opera, oper luci che arrivano prevalentemente fino ad un massimo di 40 m circa.

Per quelli in acciaio gli impalcati sono per la maggior parte a sezione mista acciaio-calcestruzzo, con travi a doppio T e in parte minore sono composti a sezione mista acciaio-calcestruzzo con travi a cassone chiuso. Infine, in modo residuale si trovano impalcati a lastra ortotropa ed a trave reticolare.

A completamento delle informazioni si richiama di seguito uno studio presente nel database del Bridge Information System (I.Br.I.D) sui ponti stradali esistenti in Italia, dal quale si ricava che meno del 6% di essi sono in carpenteria metallica ed in strutture miste acciaio-calcestruzzo, così come identificati in precedenza.

Nonostante questo documento non sia riferito ai ponti ferroviari, sembra interessante riportare i risultati di una analisi eseguita nel 2007, a livello europeo "Sustainable Bridges - Load and Resistance Assessments of Railway Bridges" [41], sui ponti ferroviari esistenti realizzata da un gruppo di ricerca formato da 32 partners, tra cui proprietari di ponti, consulenti, appaltatori, istituti di ricerca e università, in 16 paesi dell'UE e in Svizzera dove vengono evidenziati i materiali utilizzati in funzione dell'età dei ponti analizzati. È interessante rilevare che quasi il 75% dei ponti esistenti hanno più di 50 anni e circa il 35% di tutti questi hanno più di 100 anni.

Queste cifre sono il risultato dell'indagine su circa 220 mila campioni corrispondenti a vari tipi di ponti costruiti con materiali diversi, tra cui ponti in calcestruzzo armato e c.a.p. (Concrete), in strutture miste in genere con diversi materiali (Composite nel grafico), ponti in carpenteria metalllica (Metal) e ponti in muratura ad arco (Masonry). Nella figura si riportano i risultati dell'indagine.

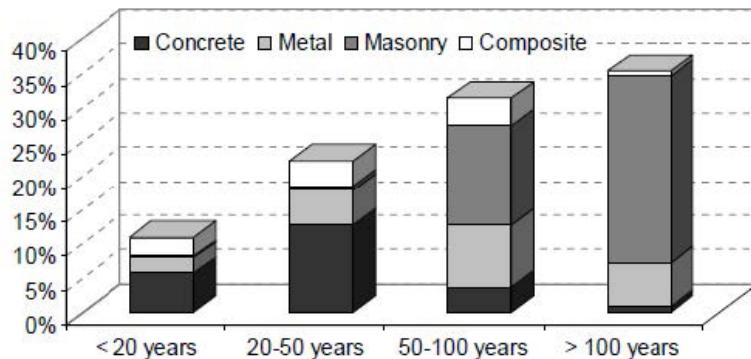


Figura 2.2 - Distribuzione dei tipi di ponte in base al materiale da costruzione per intervalli di età.

Dallo studio emerge che deve essere prestata particolare attenzione alle vecchie tipologie di ponti (ad esempio ponti in acciaio con chiodi, ponti ad arco in muratura) dal momento che costituiscono un numero significativo della popolazione dei ponti esistenti. Inoltre, si evince che i ponti con campate minori di 40m sono più numerosi in confronto ai ponti più lunghi. Tuttavia, i ponti con campate più lunghe non possono essere trascurati perché il loro costo di manutenzione o sostituzione può essere notevolmente superiore rispetto a quello dei ponti con campate più corte.

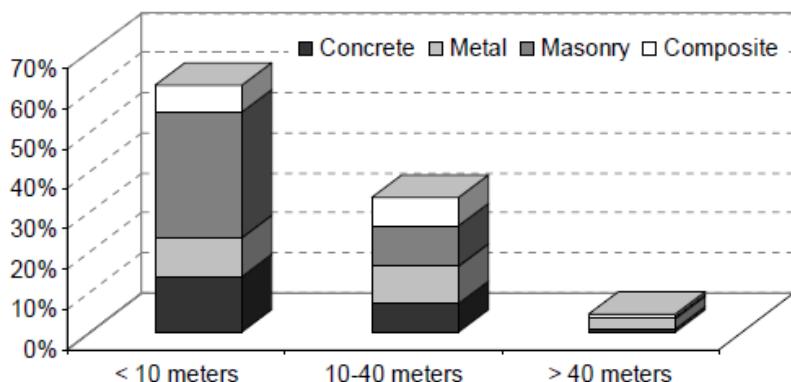


Figura 2.3 - Distribuzione dei ponti esistenti considerando la lunghezza della campata e il materiale da costruzione.

Dalla ricerca scaturisce che la richiesta di trasporti capillari sui paesi sarà sempre in aumento e denota come in un futuro breve sarà fondamentale intervenire in modo corretto e consapevole sui ponti esistenti analizzando profondamente i fenomeni che producono il loro degrado attuando valide misure di monitoraggio e conseguente manutenzione.

Per quanto riguarda i ponti in acciaio, il fenomeno prevalentemente per il degrado è il processo di corrosione e, con incidenza minore, l'allentamento e la rottura delle giunzioni. Cenni sull'argomento sono già trattati nel Quaderno Tecnico n. 16 "Interventi sugli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo" al quale si rimanda, mentre ulteriori approfondimenti saranno sviluppati nel capitolo 3.

Anche i ponti e i viadotti in calcestruzzo armato, ordinario o precompresso, durante la loro vita utile sono caratterizzati da fenomeni di degrado dovuto a cause che possono essere di natura ambientale o di non idonea esecuzione. I due fenomeni di degrado più diffusi nelle opere in calcestruzzo armato che provocano una riduzione del pH tale da innescare la corrosione sono la carbonatazione e l'attacco cloridrico.

Il calcestruzzo può essere interessato da un processo di ammaloramento più o meno diffuso, con presenza di fessure, lesioni e distacchi accentuati dall'eventuale presenza di infiltrazioni di acque ad alto contenuto di cloruri a causa dell'utilizzo di sali disgelanti sulla pavimentazione stradale.

Per approfondimenti sul degrado del calcestruzzo e corrosione delle barre di armatura, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 "Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati".

Quando, invece, il fenomeno di degrado sia tale da dover ricorrere alla sostituzione dell'intero ponte o di una campata di esso, il presente documento riporta al capitolo 4 uno studio sulla sostituzione di impalcati esistenti in c.a.p. e c.a. con nuovi impalcati in carpenteria metallica, valutando delle campate standard in un range di luci da 25 a 35 m definendo dei possibili standard ed analizzando le caratteristiche dell'intervento. A questo proposito, al fine del dimensionamento di un impalcato in acciaio in sostituzione di eventuali campate fortemente danneggiate, si riporta il range di variabilità di luce ed altezza delle travi dei viadotti in c.a.p., esistenti, in carico ad ANAS.

Luce viadotti		Altezza travi+soletta	
min m	max m	min m	max m
20,00	25,00	1,10	1,80
25,00	30,00	1,70	2,20
30,00	35,00	1,80	2,50
35,00	40,00	2,00	2,50

Tabella 2.2 - Range di variabilità di luce ed altezza delle travi di viadotti in c.a.p.

3. Manutenzione dei ponti in acciaio esistenti

3.1 Censimento e ispezioni visive

Nel programma di manutenzione delle opere d'arte stradali la funzione determinante, fulcro di tutte le operazioni successive, è l'ispezione visiva. Dall'ispezione scaturisce una serie di iniziative utili per una corretta gestione del patrimonio, dal risultato dipende la decisione di effettuare un ulteriore sopralluogo e/o la scelta di svolgere indagini sperimentali o di limitare o chiudere temporaneamente la viabilità.

La normativa relativa al controllo delle opere d'arte stradali in Italia si basa sulle circolari ministeriali 19/7/67 e 25/02/91, non essendo presenti normative specifiche sviluppate più recentemente.

Lo strumento di base per la catalogazione dei danni alle strutture è rappresentato dalle schede di ispezione che riportano le informazioni base sulle caratteristiche della struttura, divise in:

- Caratteristiche dimensionali dell'opera, riportando la geometria, i materiali, le soluzioni strutturali e le caratteristiche al contorno che possono avere un'influenza sul funzionamento delle strutture;
- Il rapporto di ispezione delle strutture, includendo, per ogni elemento strutturale, la descrizione e la localizzazione e la stima delle dimensioni delle eventuali patologie incontrate e del loro stato di evoluzione. È opportuno definire uno standard per quanto riguarda la lista degli elementi strutturali da controllare, il tipo di patologie che potranno essere incontrate e la valutazione dello stato di gravità del danno rilevato.

ANAS ha standardizzato le ispezioni attraverso un nuovo modello di manutenzione denominato Bridge Management System (BMS). L'obiettivo è di creare un database per la programmazione degli interventi, con un'ottimizzazione delle risorse in maniera tale che ci sia univocità di giudizio a livello nazionale. A questo scopo serve un modello standard con una pianificazione centralizzata che incrementi la sicurezza sulle reti stradali italiane gestite da ANAS. Questo modello prevede tre tipologie di ispezioni, differenti in base alla tipologia, alla frequenza e all'ispettore che la esegue.

La più frequente è l'Ispezione Ricorrente. L'ispezione è visiva e senza mezzi speciali con controllo del piano viabile, delle barriere di sicurezza e dei parapetti, degli elementi strutturali, degli appoggi, dei giunti, dei drenaggi, dei cedimenti del terreno e di problemi in alveo come erosione delle pile e delle spalle del ponte. Si svolge ogni trimestre e la compie un semplice ispettore.

Con cadenza annuale si esegue l'Ispezione Principale per ponti con $L \geq 30$ m e per ponti di qualsiasi luce a seguito di allerte riscontrate durante l'ispezione Ricorrente. Deve essere svolta con una strumentazione per eventuali rilievi e prove non distruttive speditive da un Ingegnere con comprovata esperienza in materia di ispezioni di ponti e viadotti.

L'obiettivo è di rilevare i difetti presenti nei singoli componenti dell'opera, la loro estensione e gravità, secondo criteri e linee guida che permettano di avere risultati confrontabili per ogni opera.

Nella scheda di Ispezione Principale i difetti contemplati sulle carpenterie metalliche sono le cricche di saldature, lo sfogliamento della vernice, l'allentamento dei bulloni, i perni deformati o tranciati, deformazioni di Anime/Piattabande delle travi a T, deformazioni delle pareti degli scatolari, ristagni di acqua, lesioni dei nodi e corrosione generalizzata.

Infine, vi è l'Ispezione Approfondita da compiere con mezzi speciali o personale abilitato per particolari mansioni come ad esempio ispezioni subacquee. Tale ispezione è condotta ogni qualvolta si ritenga necessaria, in funzione ai dati raccolti dalle Ispezioni Principali oppure a seguito di eventi eccezionali di forte intensità, ad esempio un sisma di magnitudo significativa, piene fluviali che abbiano raggiunto la quota di intradosso o provocato fenomeni di erosione delle pile e/o delle spalle, incendi o incidenti che abbiano compromesso la sicurezza della struttura. È eseguita da un Ingegnere strutturista con squadra di tecnici ed eventuale personale con abilitazioni per specifiche attività. Ad ispezione conclusa si compila la specifica scheda di Ispezione Approfondita ed eventualmente si aggiorna la scheda di Ispezione Principale se il giudizio dello stato di conservazione dei vari componenti della struttura è cambiato.

La scheda di ispezione Principale prevede la possibilità di esprimere un giudizio: Pessimo corrisponde ad un elemento non funzionante o non visibile e le difettosità associate alle strutture in acciaio sono la rottura di saldature, deformazioni, tranciamenti di bulloni o flange, rottura di profilati e lesioni.

Quando invece si hanno difetti severi che provocano danni si ha un giudizio Cattivo e corrisponde ad un difetto di ossidazione e corrosione lieve di elementi strutturali, allentamenti di bulloni, cricche di saldatura. Laddove vi sono difetti moderati che potrebbero provocare danni si ha un giudizio Mediocre, che corrisponde ad un'anomalia di sfogliamento della vernice, ossidazione superficiale con leggera riduzione di spessore. Il grado di conservazione Discreto individua difetti minori che non provocano danni ingenti come sfogliamento della vernice, ossidazione superficiale, ristagni di acqua, deformazioni permanenti.

Il giudizio Ottimo non presenta difettosità associate.

3.2 Valutazione dello stato di conservazione della struttura

Il Quaderno Tecnico numero 16 di ANAS fornisce una descrizione delle patologie che possono essere incontrate durante le ispezioni di impalcati da ponte metallici e, parallelamente, fornisce delle indicazioni sui possibili interventi di ripristino che possono rendersi necessari per riparare danni sugli impalcati metallici esistenti.

Tali operazioni per risultare efficaci devono essere considerate all'interno del Piano Globale di ispezione, di accompagnamento e di manutenzione delle Opere d'Arte dell'intera rete stradale. Tale piano si basa come già visto in precedenza in ispezioni periodiche dello stato di salute delle opere che permettano la catalogazione delle patologie e la pianificazione degli eventuali interventi di manutenzione sulla base dei risultati delle ispezioni, considerando l'ottimizzazione delle risorse disponibili per la manutenzione della rete.

Lo stato di conservazione dell'opera è espresso attraverso due fattori derivanti dalle ispezioni effettuate, la Funzionalità dell'opera [IF] cioè la capacità di garantire la continuità di servizio in sicurezza e l'Indice di Degrado dell'Opera [IDOp].

Come ultimo passaggio si calcola l'Indice di Rilevanza del Degrado (IRD) applicando dei coefficienti amplificativi ai punteggi ottenuti in base alla vulnerabilità strutturale (materiale, schema statico ed età), ai parametri ambientali (quota sul livello del mare, distanza dal mare e pericolosità sismica idraulica e geologica) ed ai parametri di esercizio (tipologia di traffico, interventi passati).

Il modello di manutenzione denominato Bridge Management System elabora, attraverso un processo logico schematizzato ad albero decisionale, gli Indici di Rilevanza del Degrado ottenuti e permette di definire i piani di intervento per la singola opera.

Definire l'evoluzione storica dello stato di conservazione dell'opera d'arte, confrontare le valutazioni effettuate durante l'ispezione attuale con le considerazioni riportate nelle ispezioni precedenti permette di avere un'immagine completa dell'evoluzione dello stato patologico delle strutture. Soltanto in questo quadro complessivo è possibile valutare in modo preciso l'esecuzione di eventuali interventi di riparazione e quelli di rinforzo delle strutture esistenti.

Interventi di Manutenzione

Sulla base della classificazione delle patologie, svolta a partire dalle ispezioni visive utilizzando il sistema di classificazione standard fornito dal gestore della rete, è possibile definire la necessità di azioni correttive sulle strutture. Tali azioni potranno essere più o meno estese a seconda del tipo di danno, della sua localizzazione e del livello del degrado. Gli interventi possono essere rappresentati da un monitoraggio continuo della patologia e da nuove ispezioni approfondite. Insieme a nuove ispezioni visive dettagliate, si può disporre lo svolgimento di test non distruttivi, indagini distruttive e test di laboratorio volti alla definizione dell'esatta entità del danno rilevato.

Se il danno è poco esteso si eseguono interventi localizzati, ossia interventi di manutenzione che prevedano la riparazione superficiale dei materiali ricomponendo, per esempio, gli strati di protezione previsti in progetto o svolgendo interventi di riparazione che non influiscano sul comportamento globale della struttura e sulla funzionalità dell'opera.

Infine, se il danno è molto esteso si esegue un intervento di rinforzo o di sostituzione, è il caso in cui il danno è tale da ridurre sensibilmente la capacità portante e/o la durabilità di un intero elemento strutturale; in questo caso diviene necessario un intervento di rinforzo o, qualora ritenuto conveniente, si provvede alla sostituzione dell'intero elemento strutturale.

Proprio su questo tipo di intervento ricade lo studio proposto al capitolo 4.

3.2.1 Cenni sull'adeguamento sismico

Sostituire opere esistenti in calcestruzzo o c.a.p con nuovi elementi in carpenteria metallica conferisce un migliore comportamento del ponte o viadotto di fronte alle azioni sismiche, trasferendo minori sollecitazioni alle sottostrutture, data la minore massa degli elementi in carpenteria metallica. In questi casi è possibile inquadrare l'intervento come un intervento di riparazione o locale (in accordo a quanto previsto dal punto C8.8.7 della Circ. 21/01/2019 n.7 C.S.LL.PP.), oppure, qualora ne ricorrono le condizioni, procedere all'adeguamento sismico o al miglioramento delle pile e delle spalle del ponte le quali saranno sottoposte ad azioni verticali e orizzontali molto più contenute delle precedenti. Si dovrà inoltre valutare lo stato dei pulvini esistenti ed il loro eventuale adeguamento ai nuovi dispositivi di appoggio.

Si trascrivono alcune considerazioni scaturite dalle campate "standard", proposte successivamente al capitolo 4, a sostituzione delle campate in c.a.p/c.a. maggiormente in uso.

A mero scopo illustrativo di seguito si prendono in esame i carichi trasmessi alle pile dovuti al peso proprio delle campate standard, escluso il contributo della soletta superiore e delle finiture, le quali sono pressoché identiche per tutte le soluzioni.

Per travi isostatiche con campate di 25 m di luce, il carico trasmesso agli appoggi dovuto al peso proprio delle travi risulta essere:

- nell'ordine delle 130t per impalcati con travi a doppio "T" in c.a.p esistenti tipicamente in uso qualche decennio fa;

- per impalcati realizzati con soluzioni in acciaio, invece:
 - o dalle 20t alle 35t, per impalcati con travi laminate, in funzione della soluzione bitrave o multitrave con acciai di qualità S355 o S460;
 - o nell'ordine delle 35t per impalcati con travi in lamiera saldate a doppio "T in qualità S355;
 - o dalle 20t alle 25t per impalcati con trave reticolare con profili tubolari in qualità S460NH o S355NH.

Da una prima analisi si evince un netto abbattimento dei carichi agenti dovuti al peso proprio delle travi. I nuovi carichi verticali, dovuti a quest'ultimi, trasmessi alle pile vengono ridotti infatti di circa il 75-85% rispetto a quelli trasmessi dalle strutture esistenti.

Di conseguenza, essendo i carichi sismici strettamente legati alle masse, l'azione sismica viene altamente ridotta rispetto a quella trasmessa dalla struttura esistente.

Anche per travi isostatiche con campate di 35 m di luce è possibile fare analoghe considerazioni, ossia il peso proprio delle travi in c.a.p. esistenti risulta essere nell'ordine 220t/250t, mentre con soluzioni multi-trave con profilo laminato e bi-trave in lamiera saldata il peso si riduce di circa il 70 – 80%, fino ad arrivare a soluzioni con trave a cassone o trave reticolare nei quali il peso viene ridotto anche oltre l'85% rispetto a quello delle strutture esistenti.

4. Sostituzione di impalcati esistenti in c.a.p./c.a. con strutture in carpenteria metallica

L'oggetto di questo capitolo non è la progettazione di un impalcato, bensì il confronto di diverse soluzioni di impalcato con identiche luci standard, in particolare:

- bi-trave e multi-trave con profili laminati;
- trave a cassone;
- bi-trave con profili saldati;
- trave reticolare con profili cavi a sezione circolare;

Si premette che gli esempi standardizzati sono relativi alle luci maggiormente ricorrenti dei ponti ANAS in c.a. e c.a.p. esistenti, che vanno circa da 25m a 35m così come definito precedentemente.

Si è provveduto ad ipotizzare una larghezza d'appoggio delle travi la minore possibile per permettere di ridurre al minimo gli interventi sui pulvini esistenti.

Il confronto tra le soluzioni proposte può essere esteso anche a luci diverse, entro il range dei 40m, rimanendo valide le considerazioni generali e le conclusioni tratte nel presente documento.

È importante sottolineare inoltre che l'acciaio, nei casi in cui viene conferita la continuità alle campate, offre eccellenti prestazioni in termini di ottimizzazione del materiale e pertanto in riduzione dei costi.

Questo perché nelle strutture iperstatiche le travi in acciaio lavorano allo stesso modo sia nelle zone in cui il momento risulta positivo (in campata), sia in quelle con momento negativo (in appoggio).

Per ogni soluzione proposta vengono indicati lo schema statico considerato, le caratteristiche degli acciai impiegati ed il peso al metro quadro della carpenteria metallica. Questo ultimo dato fa riferimento al peso degli elementi costruttivi e potrebbe essere maggiorato in funzione del piastrame utilizzato per le giunzioni, della bulloneria e/o delle saldature. Di seguito vengono presentati gli esempi delle tipologie di campata in carpenteria metallica sopracitate, valutandone le principali caratteristiche.

4.1 Progettazione e dimensionamento per campate tipo standard dei ponti ANAS

La progettazione dei ponti è vincolata dalla presenza di elementi naturali ed artificiali che condizionano il progetto. Nella questione trattata in questo quaderno, ossia la sostituzione del solo impalcato, si sommano altri vincoli fissi quali l'esistenza di spalle e pile con geometrie e capacità di resistenza già fissate.

Tutti gli elementi citati giocano un ruolo fondamentale nella progettazione del nuovo impalcato, poiché condizionano non solo l'entità stessa della struttura, ma si intrecciano con gli aspetti connessi alla realizzazione e al montaggio dell'opera. Perciò gli obblighi normativi, la scelta del materiale, la tipologia costruttiva, il montaggio ed i vincoli precedentemente citati devono essere tenuti in considerazione e correttamente valutati durante la progettazione alla pari di un'opera di nuova realizzazione.

4.1.1 Dati Generali

Nei diversi standard analizzati, per il progetto di ponti in acciaio a sostituzione di campate esistenti in c.a.p., è stato assunto:

- Normativa di riferimento: Decreto 17 gennaio 2018 [24] "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni";
- Distanza tra gli appoggi: 25 e 35 m;
- Azione Sismica: Zona 1;
- Larghezza complessiva dell'impalcato: 12 m;
- Classe di Esposizione all'azione del Vento: Zona 3, altezza dal suolo 20 m, fascia costiera.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Figura 4.1 – Tabella 3.3.I – Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s (Norme tecniche per le costruzioni 2018)

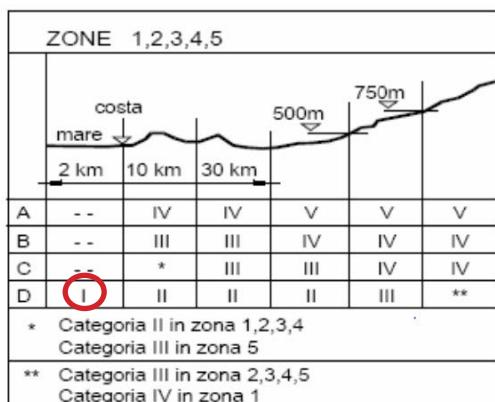


Figura 4.2 – Fig. 3.3.2 – Definizione delle categorie di esposizione (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018)

4.1.2 Caratteristiche geometriche della carreggiata

Strada a carreggiata unica (classe C1) con due corsie e due banchine laterali, rispettivamente da 3.75 m e 1.50 m. In aggiunta si prevede per i due lati una passerella di servizio di 0.75 m per una larghezza totale di 12 m, guard-rail e protezioni laterali alte 1.20 m.

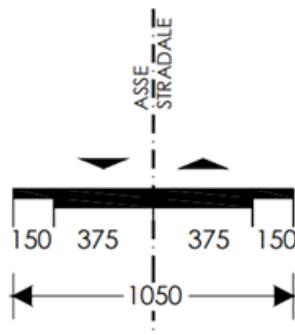


Figura 4.3 – Indicazione larghezza carreggiata per strade di classe C1

4.1.3 Ipotesi di carico

- Pesi Propri delle Strutture e Pesi Permanentii non strutturali: Strutture Metalliche, Soletta, pacchetto di asfalto (binder + usura), Barriere di Sicurezza (Guard rail) e protezioni laterali;

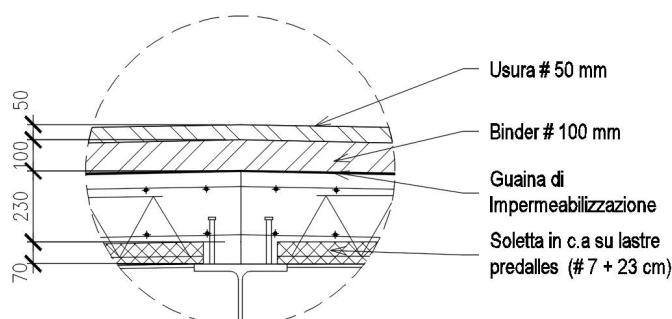


Figura 4.4 – Dettaglio pacchetto soletta in lastre predalles

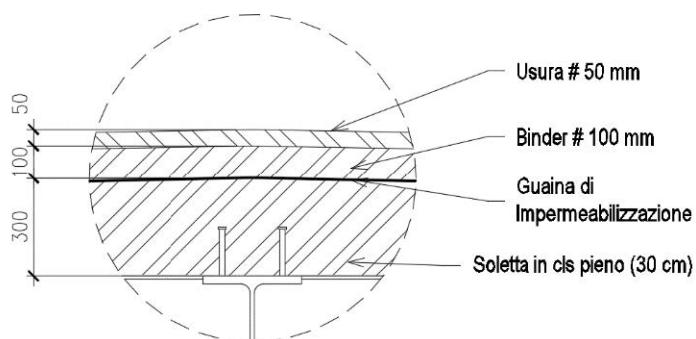


Figura 4.5 – Dettaglio pacchetto soletta in calcestruzzo pieno

- Peso proprio dei materiali costituenti l'impalcato: calcestruzzo 2500 kg/m³; Acciaio 7850 kg/m³; asfalto/isolante/ marciapiede: 2000 kg/m³;
- Pesi dei dispositivi di ritenuta: (guard-rail) 100 kg/ml; protezione esterna (veletta) 100 kg /ml; da ogni lato;

- Carichi Mobili Verticali (NTC 2018 [24] e Circolare [25] – Schema di Carico 1) – Applicando assi tandem e carichi distribuiti nelle posizioni più sfavorevoli per massimizzare gli sforzi;

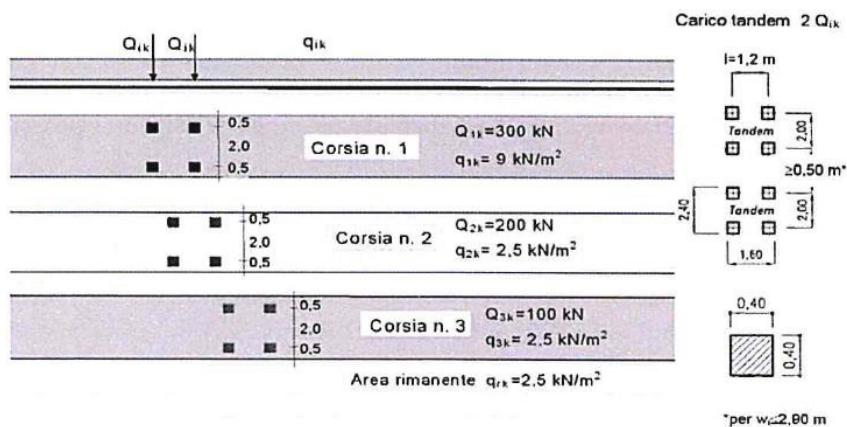


Figura 4.6 – Schema di carico 1 (dimensioni in m)

- Azione Longitudinale di Frenamento (NTC 2018 [24] e Circolare [25]) - Applicata come una forza distribuita sulla superficie della soletta;
- Azione del Vento (NTC 2018 [24] e EC 1-4 Circolare [25]) – Utilizzata la trattazione della norma italiana, considerando il coefficiente C_p suggerito dagli Eurocodici per i ponti con geometria in oggetto;
- Azioni Termiche (NTC 2018 [24] e Circolare [25]) – Costanti e variabili sulla Sezione;
- Limite di freccia: $L / 400$ sotto carichi variabili di traffico (NTC2018 [24] e Circolare [25]);

Per le seguenti soluzioni sono state proposte sia la soletta prefabbricata in lastre predalles che permette di velocizzare la posa in opera (7 cm + 23 cm), sia il getto pieno in calcestruzzo di spessore 30 cm.

Fa eccezione solo la soluzione con profili laminati accostati (chiusi) che presuppone l'utilizzo di una soletta piena di spessore 30 cm, visto un interasse di 7 m tra le travi.

Le strutture sono state modellate attraverso software ad elementi finiti.

4.2 Esempi di soluzione multi-trave con profilo laminato

Per ognuna delle soluzioni sono state valutate due qualità di acciaio, acciaio al carbonio S460M ed acciaio autopatinabile S355J2W, (quest'ultimo più reperibile rispetto all'acciaio 355K2W).



Figura 4.7 – Esempi di ponti con soluzioni in profili laminati

4.2.1 Lunghezza di campata tipo: 25m

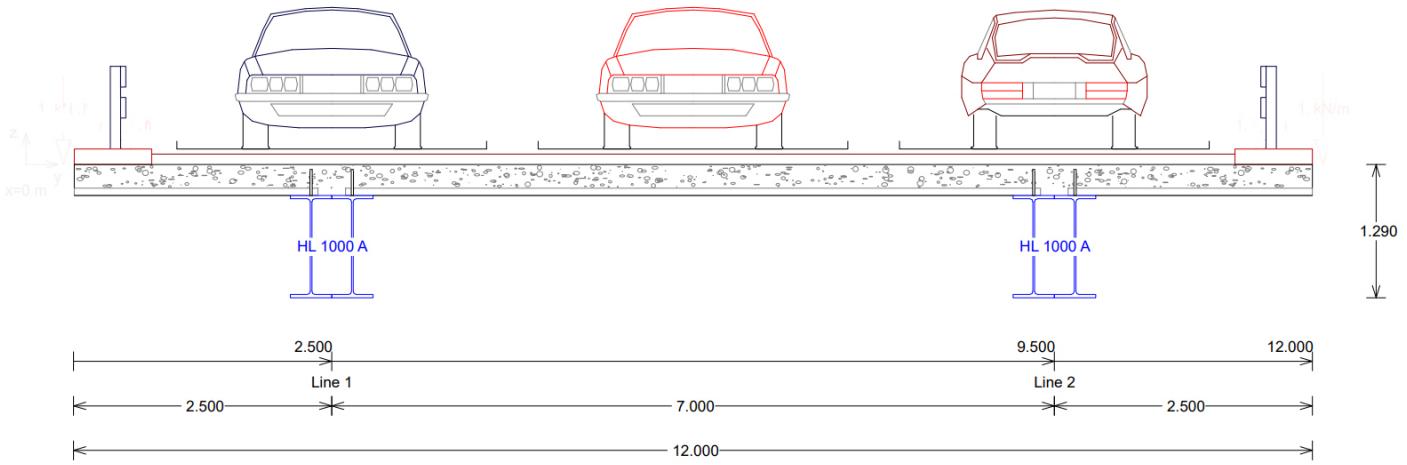
In questa breve memoria tecnica si presentano varie soluzioni strutturali a partire da profili commerciali laminati a caldo, in particolare:

- Campata singola isostatica di 25 m: Impalcato multi-trave con profilo laminato, traversi di testata in cls. armato;
- Campata singola isostatica di 25 m: Impalcato bi-trave a profilo chiuso, traversi di testata in cls. armato;

4.2.1.1 25m – Isostatico – Soluzione multi-trave con profili laminati accostati (chiusi)

Campata singola isostatica di 25 m: Impalcato multi-trave con profili laminati accostati e traversi di testata in cls. armato.

Tipo di ponte	Ponte stradale	File di travi	2
Sistema carico	NTC2018 [24]	Interasse file	7000 mm
Sistema statico	Trave isostatica	Altezza completa impalcato strutturale	+/- 1300 mm
Lunghezza impalcato	25.6 m	Trave principale	Profilo accoppiato: 2 x HL1000A/M
Luce libera statica	25.0 m	Tipo acciaio	S460M/S355J2W secondo EN10025-4/5 [4]
Angolo incrocio asse impalcato / fondazioni	+/- 90 gon	Spessore medio soletta	30cm
Larghezza impalcato	12.0 m	Traversi sulle spalle del ponte	Traverso in cls. H=1,4 m A: B =1 m
Larghezza carreggiata	Considerati 10.50m	Stima peso carpenteria Travi Principali	S460M +/- 33 tons S355J2W +/- 43 tons
Vie di corsa per schema di carico	3	Volume cls. Soletta	+/- 92 m ³
Superficie impalcato	+/- 307 m ²	Volume cls. Traversi	+/- 30 m ³
Tipo di ponte	Ponte stradale	File di travi	2



*Figura 4.8 – Sezione tipo di calcolo
(sono stati applicati assi tandem e carichi distribuiti come schema di carico 1)*

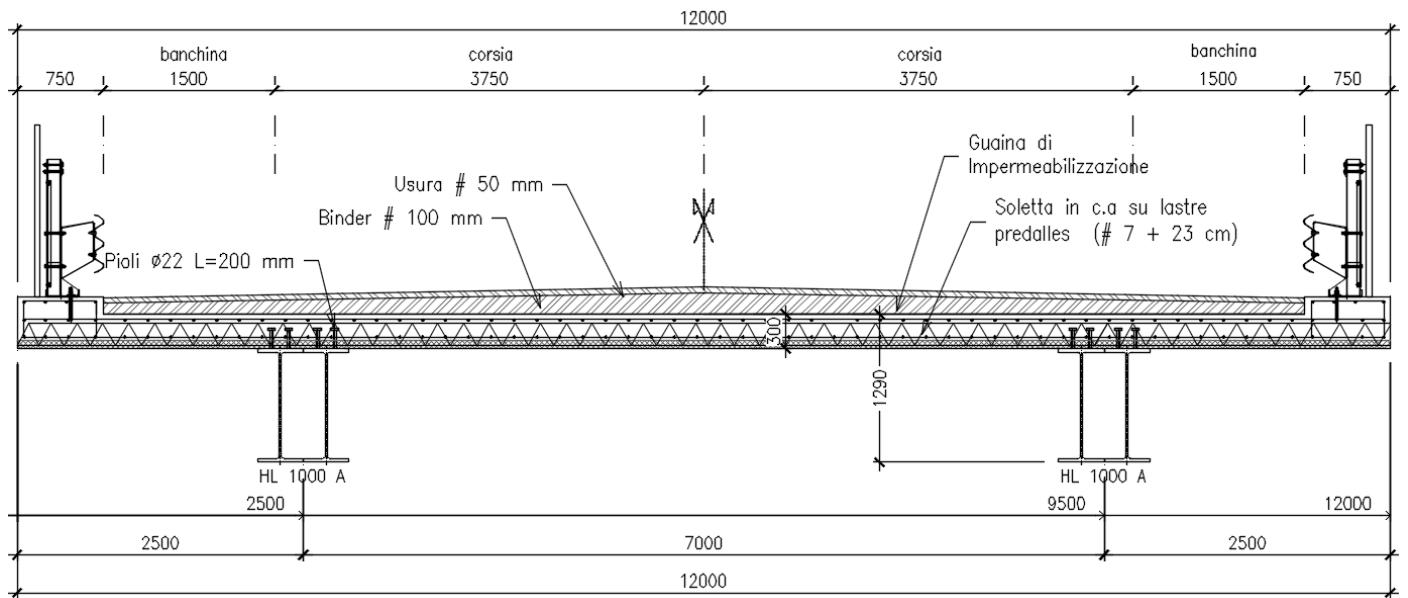


Figura 4.9 – Sezione tipo

4.2.1.2 25m – Isostatico – Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati

Campata singola isostatica di 25 m: Impalcato multi-trave con profilo laminato e traversi di testata in cls. armato.

Tipo di ponte	Ponte stradale	File di travi	6
Sistema carico	NTC2018 [24]	Interasse file	2000 mm
Sistema statico	Trave isostatica	Altezza completa impalcato strutturale	+/- 1300 mm
Lunghezza impalcato	25.6 m	Trave principale	6 x HE1000 A/M
Luce libera statica	25.0 m	Tipo acciaio	S460M/S355J2W secondo EN10025-4/5 [4]
Angolo incrocio asse impalcato / fondazioni	+/- 90 gon	Spessore medio soletta	30cm
Larghezza impalcato del ponte	12.0 m	Traversi sulle spalle	Traverso in cls. H=1,4 m A: B = 1 m
Larghezza carreggiata	Considerati 10.50m	Stima peso carpenteria Travi Principali	S460M +/- 43 tons S355J2W +/- 54 tons
Vie di corsa per schema di carico	3	Volume cls. Soletta	+/- 92 m ³
Superficie impalcato	+/- 307 m ²	Volume cls. Traversi	+/- 30 m ³

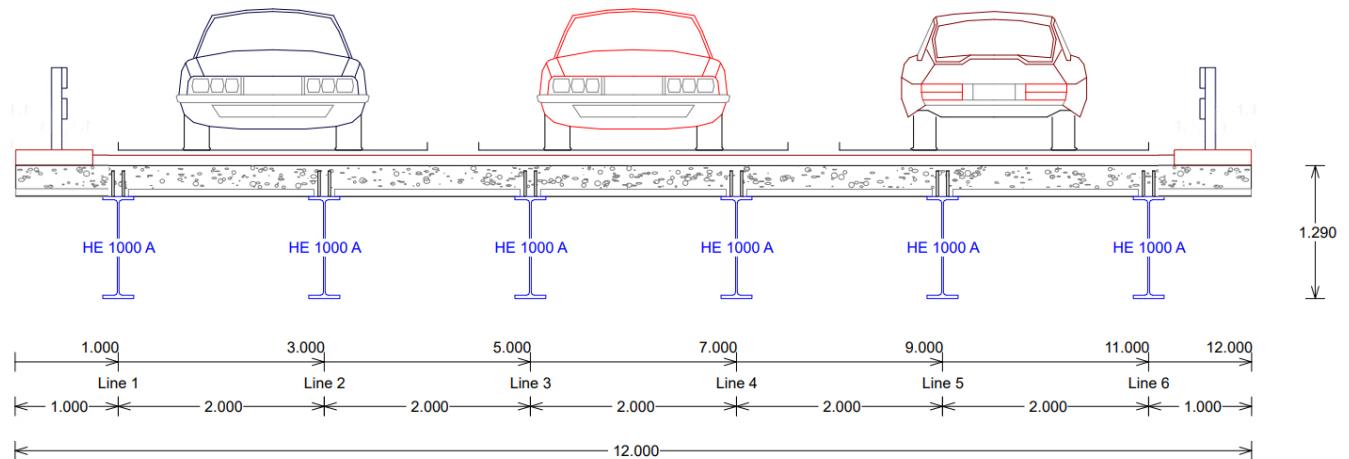


Figura 4.10 – Sezione tipo di calcolo
(sono stati applicati assi tandem e carichi distribuiti come schema di carico 1)

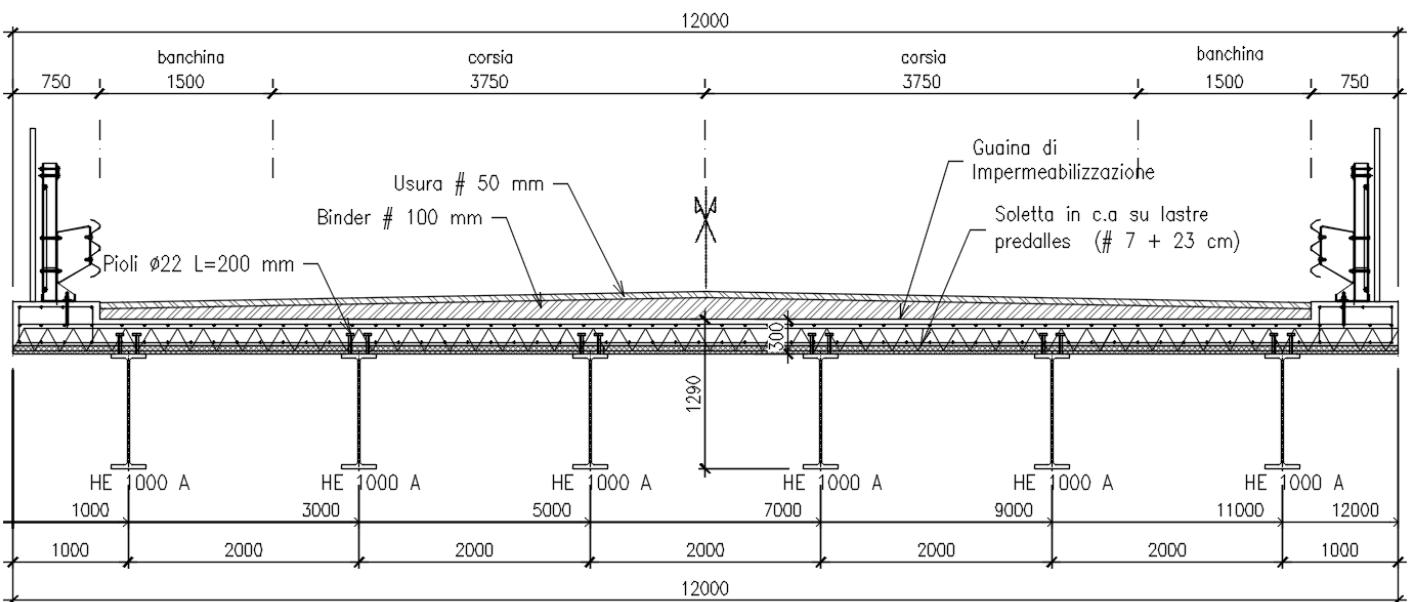


Figura 4.11 – Sezione tipo

4.2.2 Lunghezza di campata tipo: 35m – Isostatico – Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati

Campata singola isostatica di 35 m: Impalcato multi-trave a profilo aperto, traversi in cls. armato.

Tipo di ponte	Ponte stradale	File di travi	6
Sistema carico	NTC2018 [24]	Interasse file	2000 mm
Sistema statico	Trave isostatica	Altezza completa impalcato strutturale	+/- 1400 mm
Lunghezza impalcato	35.6 m	Trave principale	6 x HL1100 M 6 x HL 1100 x 548
Luce libera statica	35.0 m	Tipo acciaio	S460M/S355J2W secondo EN10025-4/5[4]
Angolo incrocio asse impalcato / fondazioni	+/- 90 gon	Spessore medio soletta Tasso armatura	30cm
Larghezza impalcato	12.0 m	Traversi sulle spalle del ponte	Traverso in cls. H=1.4 m A: B =1 m
Larghezza carreggiata	Considerati 10.50m	Stima peso carpenteria Travi Principali	S460M +/- 95 t S355J2W +/- 118 t
Vie di corsa per schema di carico	3	Volume cls. Soletta	+/- 128 m ³
Superficie impalcato	+/- 427 m ²	Volume cls. Traversi	+/- 30 m ³

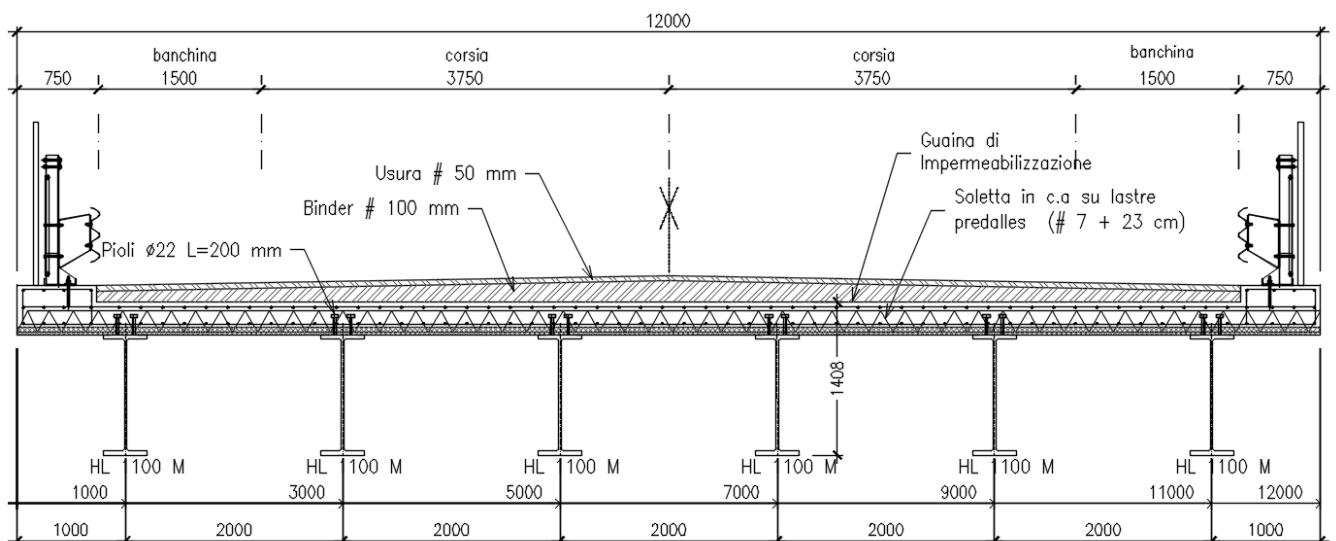
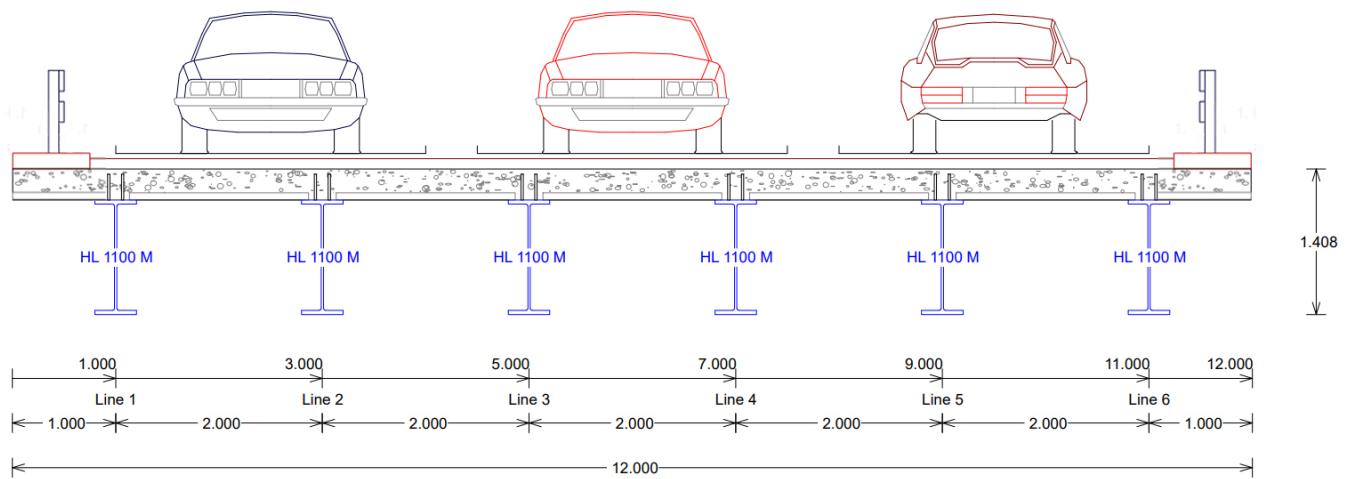


Figura 4.13 – Sezione tipo

4.2.3 Lunghezza di campata tipo: 25 m - 5 campate continue

5 campate iperstatiche di 25 m: Impalcato multi-trave profilo laminato, traversi in cls armato

Tipo di ponte	Ponte stradale	File di travi	4
Sistema carico	NTC2018 [24]	Interasse file	3000 mm
Sistema statico	Trave continua su 5 campate	Altezza completa impalcato strutturale	+/- 1300 mm
Lunghezza impalcato	125 m	Trave principale	HL1000 A/M
Luce libera statica	5 x 25.0 m	Tipo acciaio	S460M/S355J2W secondo EN10025-4/5[4]
Angolo incrocio asse impalcato / fondazioni	+/- 90 gon	Spessore medio soletta Tasso armatura	30cm
Larghezza impalcato	12.0 m	Traversi sulle spalle del ponte	Traverso in cls. H=1,4 m A: B =1 m Traverso in carpenteria metallica HEB 400
Larghezza carreggiata	Considerati 10.50m	Stima peso carpenteria Travi Principali	S460M +/- 134 t S355J2W +/- 173 t
Vie di corsa per schema di carico	3	Volume cls. Soletta	+/- 362 m ³
Superficie impalcato	+/- 1207 m ²	Volume cls. Traversi	+/- 86 m ³

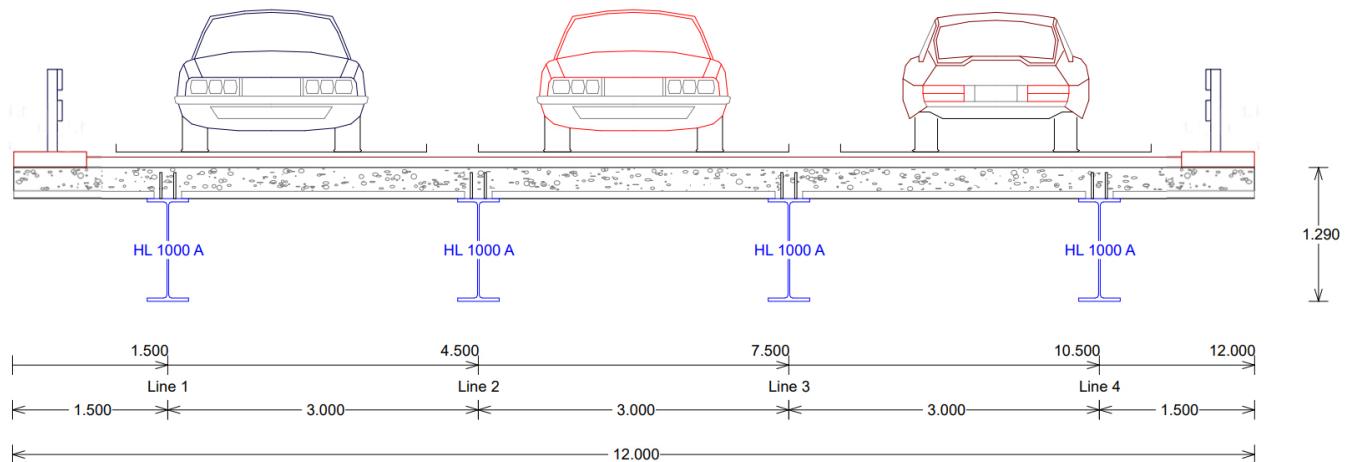


Figura 4.14 - Sezione tipo di calcolo
(sono stati applicati assi tandem e carichi distribuiti come schema di carico 1)

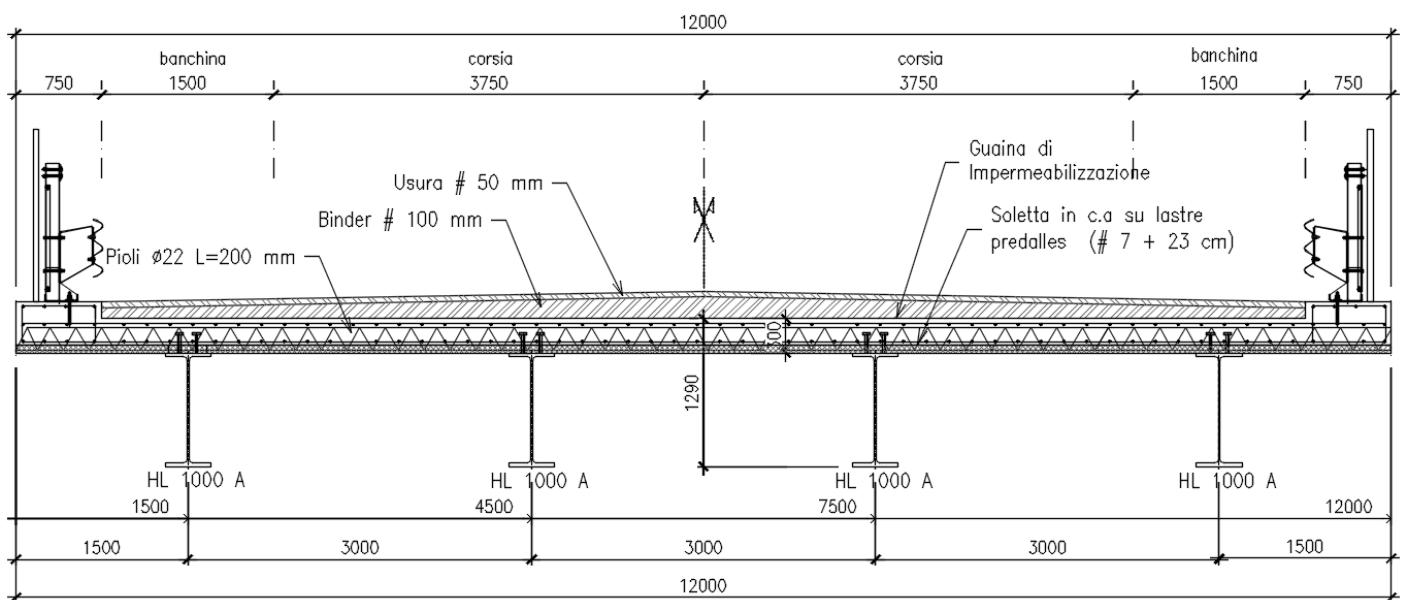


Figura 4.15 – Sezione tipo

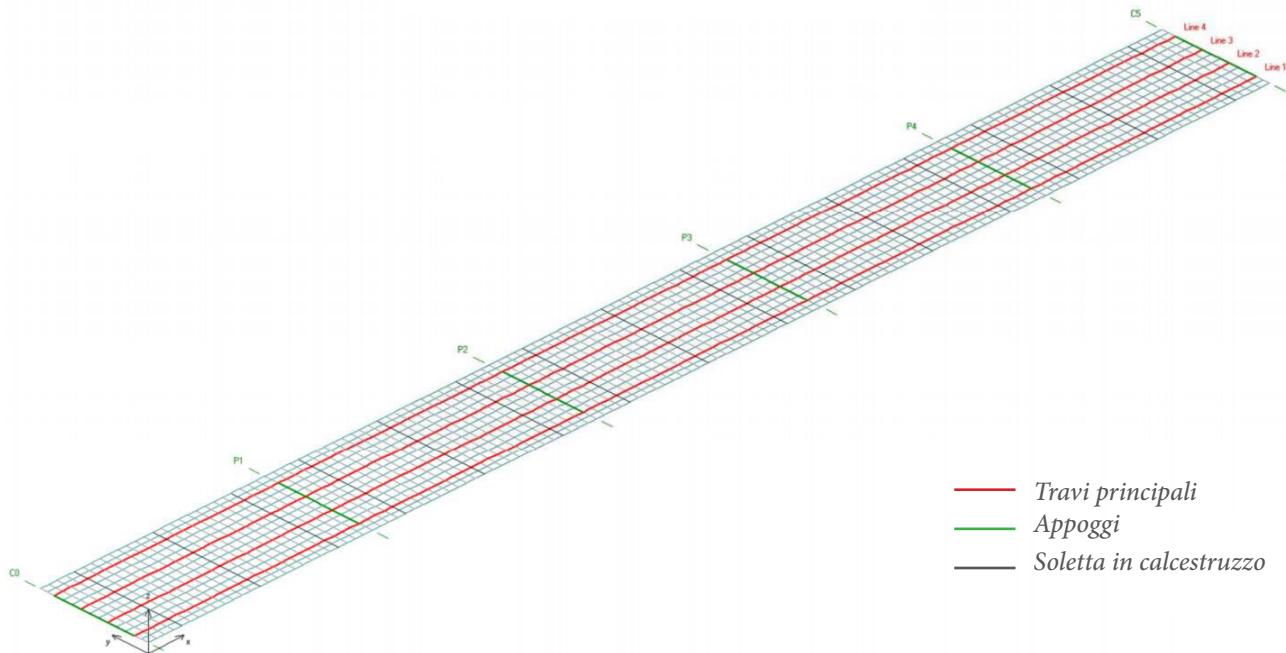


Figura 4.16 - Modello ad elementi finiti soluzione di impalcato continuo su 5 campate

I modelli ad elementi finiti per le soluzioni multi-trave con profilo laminato sono stati sviluppati attraverso il software ACOBRI®.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle sollecitazioni a cui sono soggette le travi per le quattro soluzioni studiate in precedenza:

Soluzione multi-trave				25m – Isostatico – Profili laminati accostati	25m – Isostatico – Profili laminati distanziati	35m – Isostatico – Profili laminati distanziati	25m – Iperstatico – Profili laminati distanziati
Numero di travi				2	6	6	4
SLU	Momento massimo positivo	$M_{E,(+)}$	[kNm]	19456	7213	12801	8858
	Momento resistente positivo	$M_{Rd,(+)}$		21558	8617	13702	10780
	Momento massimo negativo	$M_{E,(-)}$		-	-	-	5236
	Momento resistente negativo	$M_{Rd,(-)}$		-	-	-	6326
SLS	Freccia Sotto Carico LM1			L/543	L/540	L/412	L/609
	Prima frequenza strutturale	f1	[Hz]	2.72	2.93	1.90	2.69
	Tensione massima acciaio - Comb. Caratteristica	$\sigma_{s,SLS}$	[Mpa]	378	351	366	350
	Tensione massima armatura-Comb. Caratteristica	$\sigma_{s,SLS}$	[Mpa]	-	-	-	199
FLS	Tasso di utilizzo massimo		%	82	90	82	95

Tabella 4.1 – Tabella riassuntiva delle sollecitazioni per tipologia di soluzione di sostituzione

Note:

- 1) I valori di sollecitazioni e di resistenze sono riferiti all'acciaio alto-resistenziale (S460)
- 2) Le sezioni sono di classe 1 e 2, le resistenze sono quindi basate sul momento plastico.
- 3) I valori si riferiscono tipicamente alla trave di bordo che risulta essere la più sollecitata.

4.2.4 Esempi realizzativi



Figura 4.17 – Immagini di cantiere per il sistema di travi accoppiate



Figura 4.18 - Immagini di cantiere per il sistema di travi accoppiate



Figura 4.19 - Immagini di realizzazioni per impalcati multi-trave a profilo laminato semplice

Il traverso in calcestruzzo garantisce stabilità e rigidezza torsionale sufficienti per far sì che l'impalcato multi-trave non abbia bisogno di traversi supplementari in campata.

È possibile realizzare profili laminati con luci di 25 m, ma è necessario un trasporto eccezionale a favore del fatto che vengono risparmiati i giunti in cantiere.

Nel caso che si scelga di eseguire i giunti e trasportare profili con luci minori è possibile eseguire giunti bullonati per spessore di piattabande fino a 60 mm. Questa scelta ha il vantaggio di non richiedere un'integrazione del sistema di protezione. Inoltre, è possibile realizzare anche giunti saldati, ma in questo caso è necessario prevedere degli accorgimenti nell'esecuzione del sistema anticorrosivo.

Dati di sintesi

- Impalcato: m 25 x 12
- Tipologia: Soluzione con profili laminati accostati (chiusi) – Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M (rif. Disegno 1A):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 120 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W (rif. Disegno 1B):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 150 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

- Impalcato: m 25 x 12
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M (rif. Disegno 2A):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 150 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W (rif. Disegno 2B):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 190 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 fck=30MPa;

- Impalcato: m 35 x 12
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M (rif. Disegno 3A):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 240 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W (rif. Disegno 3B):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 290 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

- Impalcato: m 125 x 12 – 5 campate continue di 25 m
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema iperstatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M (rif. Disegno 4A):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 120 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W (rif. Disegno 4B):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in calcestruzzo armato: 150 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

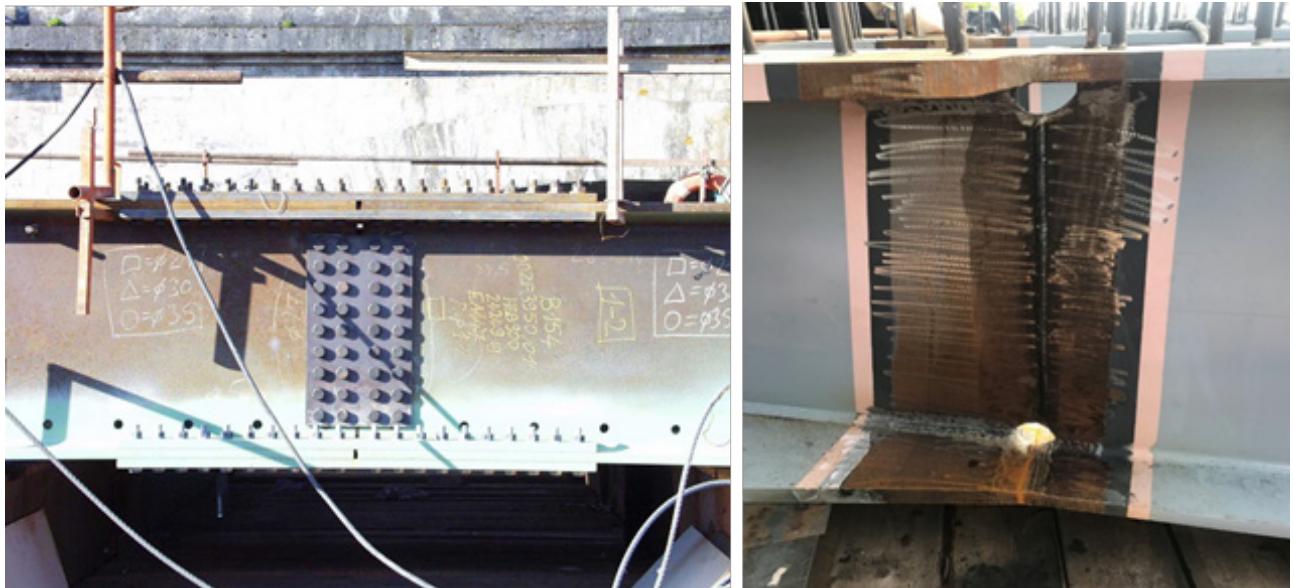


Figura 4.20 – Giunto bullonato e giunto saldato

È possibile rimpiazzare i traversi in calcestruzzo armato (Concrete Cross Beams-CCB) con elementi in acciaio posando direttamente le travi su appositi appoggi elastomerici. Esse sono irrigidite da traversi in carpenteria metallica ed in genere per le configurazioni trattate si utilizzano profili HEB 400 per gli appoggi delle spalle del ponte e profili IPE 400 per i rinforzi in campata. I traversi possono essere saldati o bullonati.

Sulle spalle del ponte i traversi vanno previsti tra tutte le travi, invece in campata vanno predisposti solo per accoppiare le travi a due a due.

Per la soluzione di 25 m si hanno due file di traversi ogni 10 m e per la soluzione di 35 m se ne dovranno prevedere tre file. Inoltre, è opportuno inserire degli irrigidimenti sui traversi.

La soluzione con traversi in carpenteria metallica è rappresentata nei disegni 4C e 4D allegati al Quaderno Tecnico, per la soluzione di campata tipo 25 m – 5 campate continue da 25 m.



Figura 4.21 – Esempio di appoggio in carpenteria metallica e traversi in appoggio e in campata

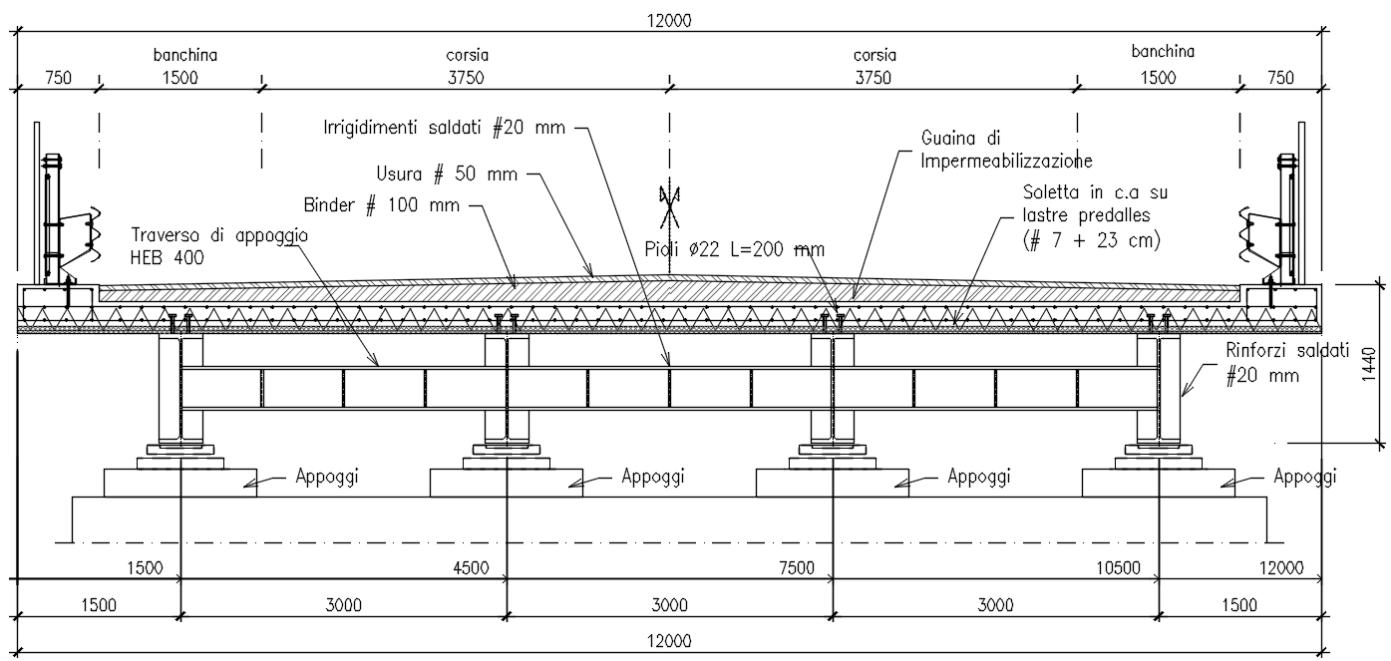


Figura 4.22 – Sezione tipo in appoggio

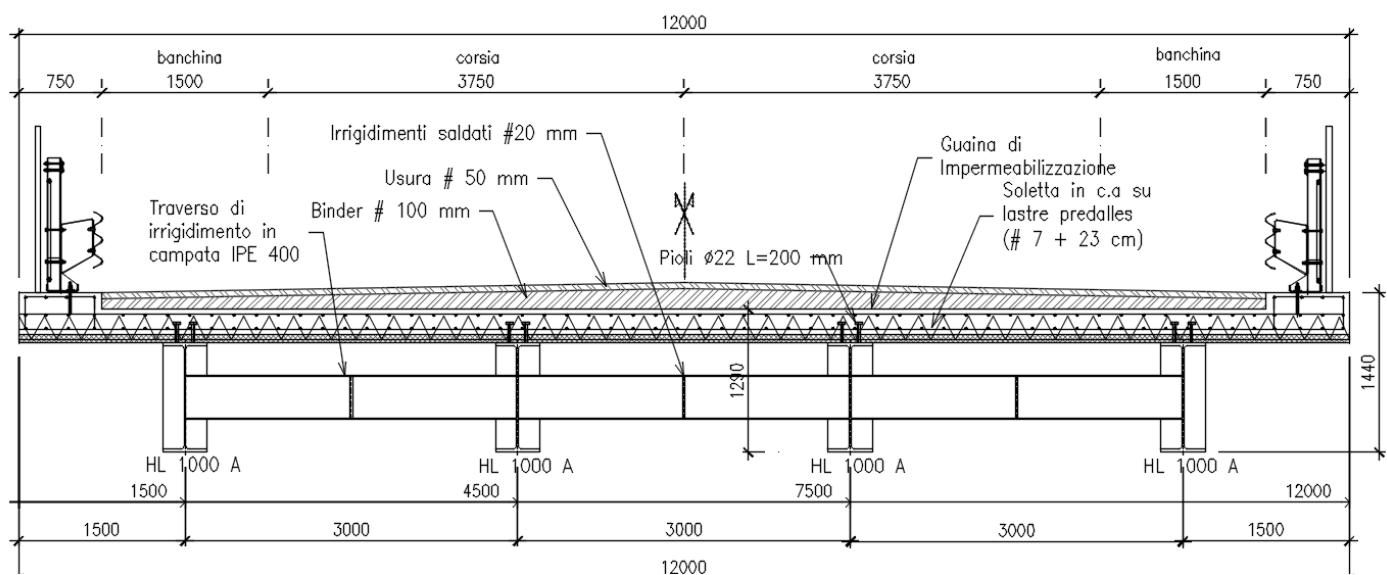


Figura 4.23 – Sezione tipo in campata

Dati di sintesi per la tipologia con traversi in metallo

- Impalcato: m 25 x 12
- Tipologia: Soluzione con profili laminati accostati (chiusi)–Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 140 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 170 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

- Impalcato: m 25 x 12
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 170 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 210 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 fck=30MPa;

- Impalcato: m 35 x 12
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema isostatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 256 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W:
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 306 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

- Impalcato: m 125 x 12 – 5 campate continue di 25 m
- Tipologia: Soluzione multi-trave con profili laminati distanziati – Schema iperstatico
- Soluzione con qualità acciaio S460M (rif. Disegno 4C):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 140 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S460M - f_{yk} =460 MPa;
- Soluzione con qualità acciaio S355J2W (rif. Disegno 4D):
Peso al mq della carpenteria Metallica con traverso in acciaio: 170 kg/m²
Caratteristiche dell'acciaio S355J2W - f_{yk} =355 MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

4.3 Esempi di soluzione con travi a cassone chiuso

4.3.1 Lunghezza di campata tipo: 35 m

- Ponte con sezione a Cassone Chiuso;
- Schema statico di trave in Doppio Appoggio;
- Larghezza complessiva dell'impalcato, 12 m;

Le caratteristiche geometrico-costitutive sono:

- Cassone alto 1,75 m (L/20);
- Soletta collaborante in calcestruzzo armato 300 mm;
- Traversi in struttura reticolare interasse m 5;
- Controventi superiori provvisori per assicurare il comportamento rigido durante l'esecuzione

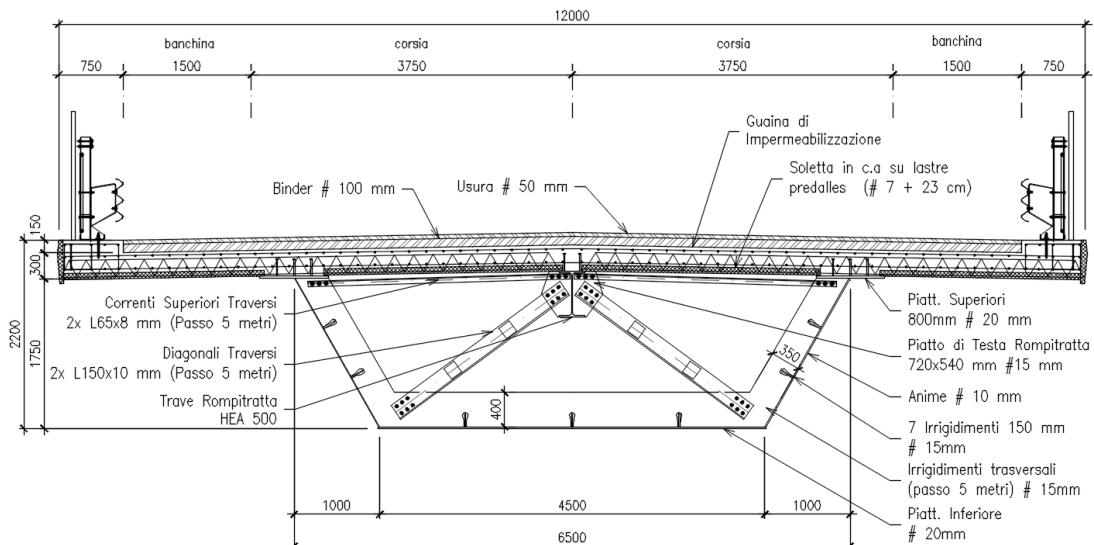


Figura 4.24 – Sezione tipo

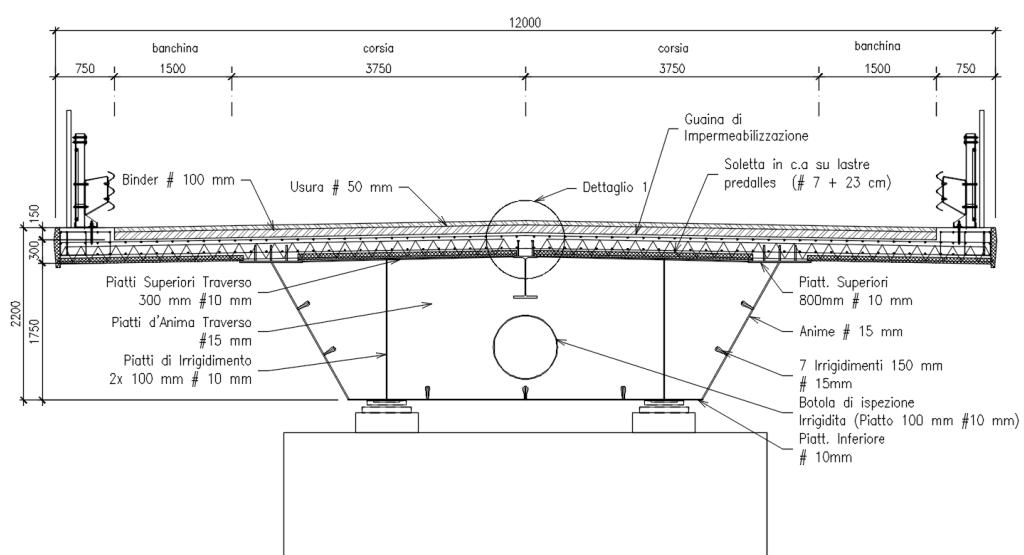


Figura 4.25 – Sezione all'appoggio

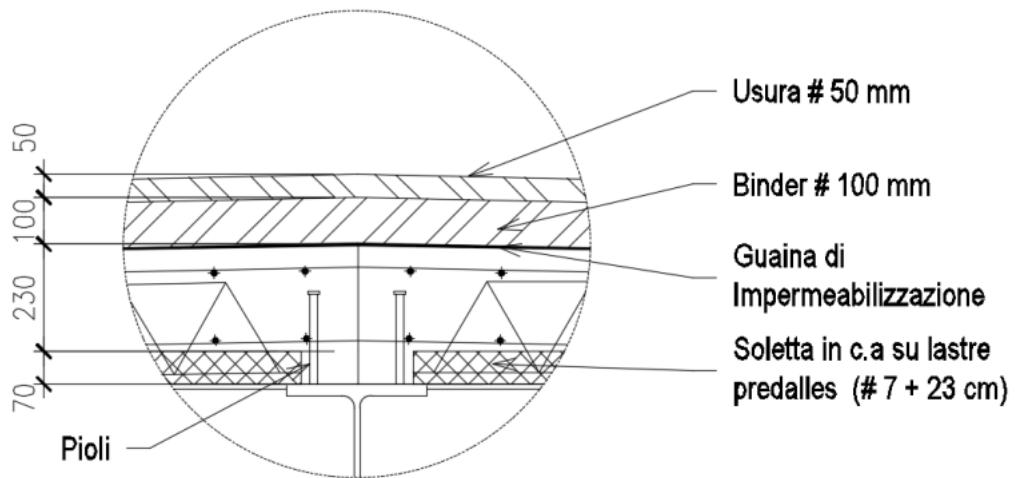


Figura 4.26 – Dettaglio Soletta

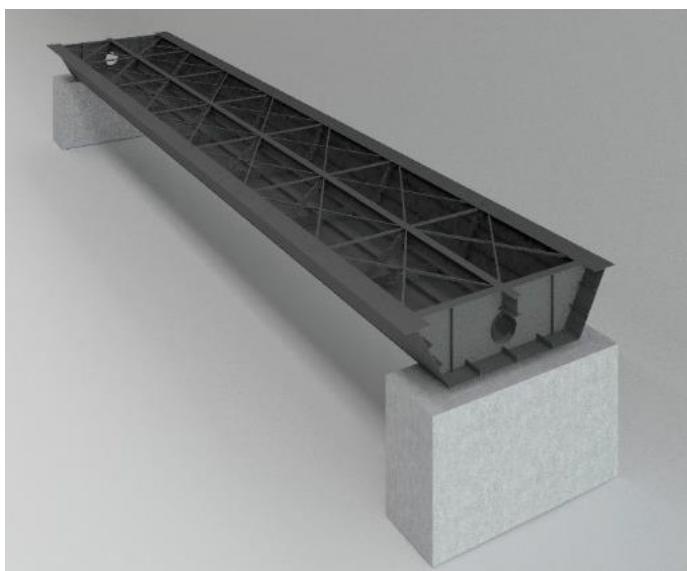
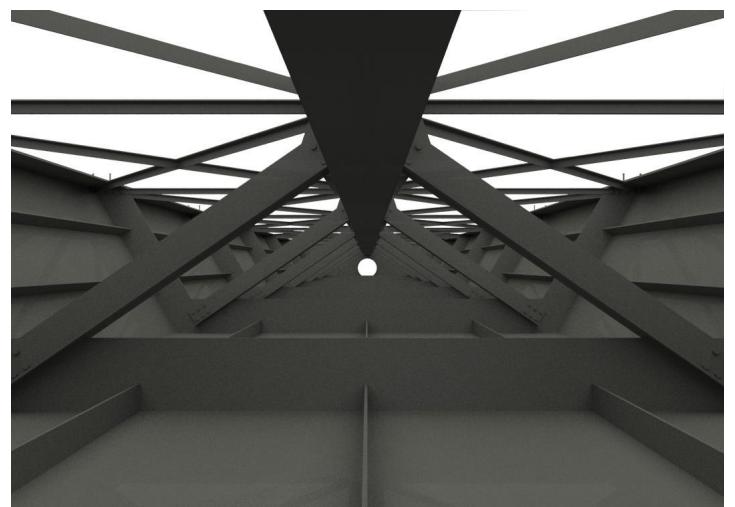
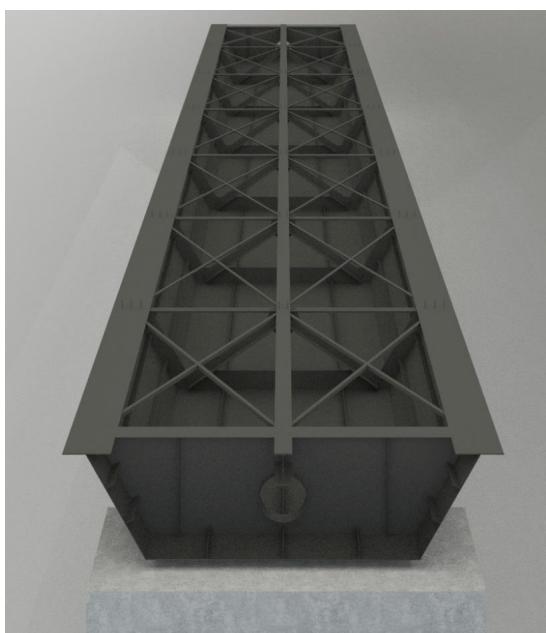


Figura 4.27 – Modello 3D



*Figura 4.28 – Vista frontale del modello 3D
Figura 4.29 – Vista interna modello 3D*

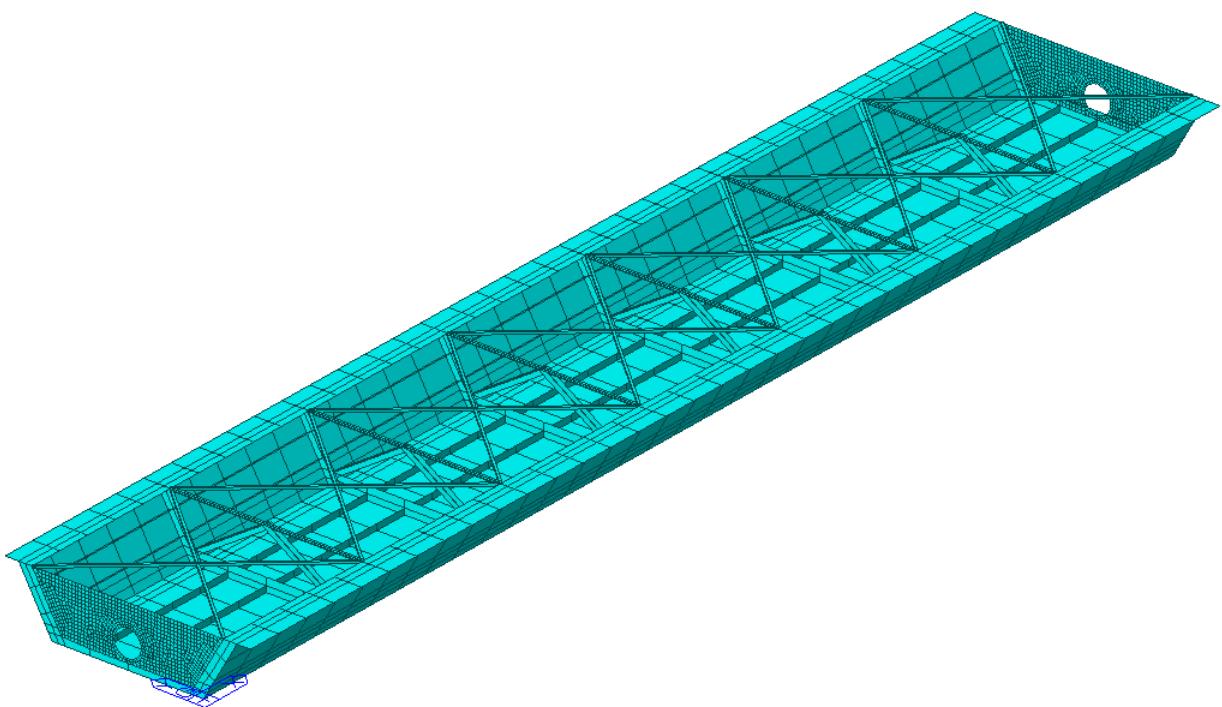


Figura 4.30 - Modello ad elementi finiti.

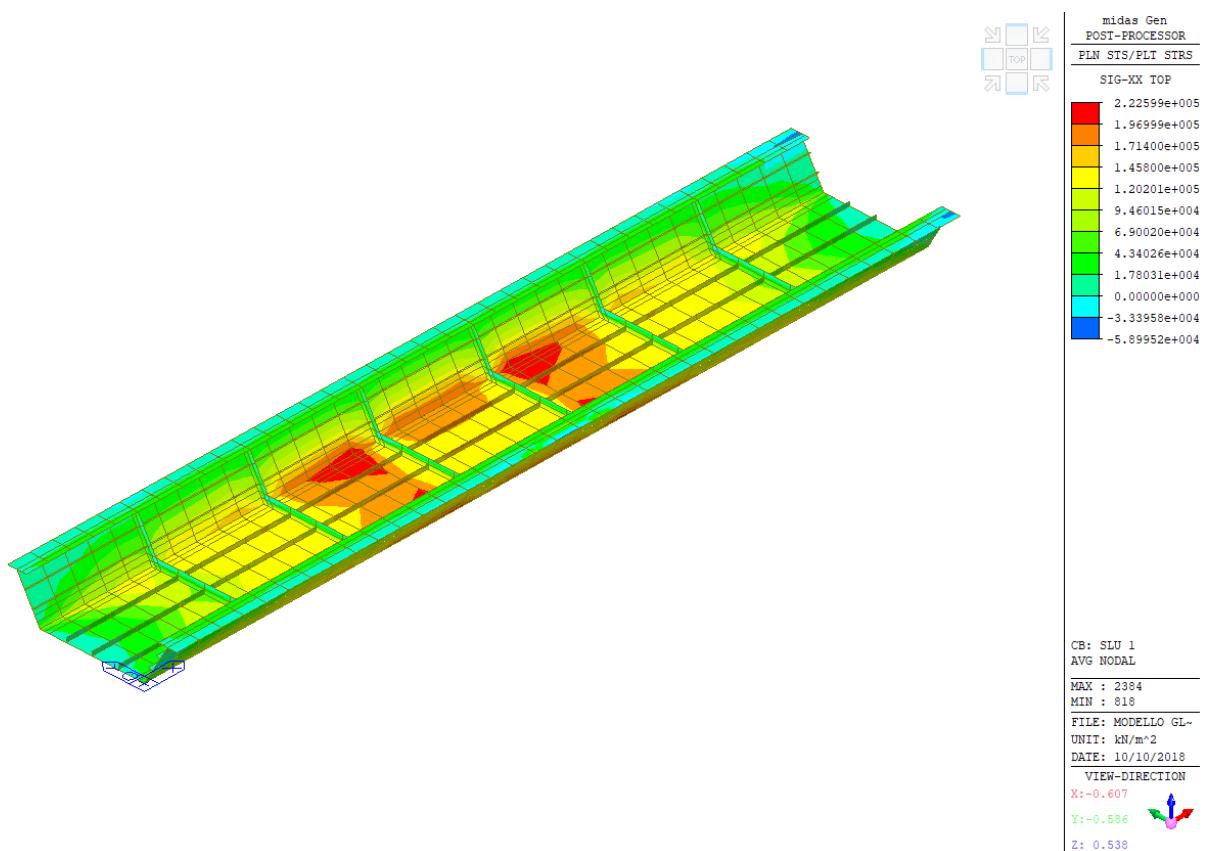


Figura 4.31 - Massime tensioni per flessione SLU

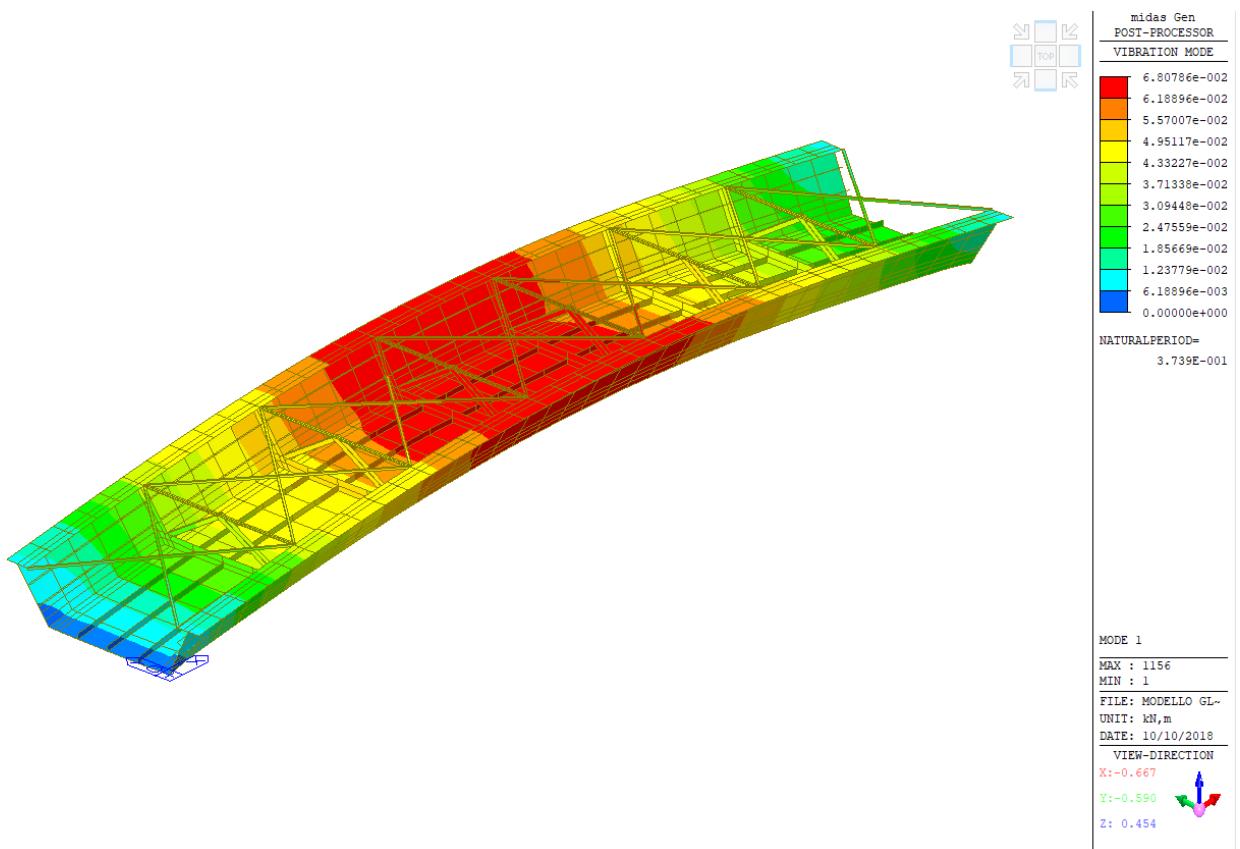


Figura 4.32 – Primo modo di vibrare verticale $T=0.37\text{ s}$

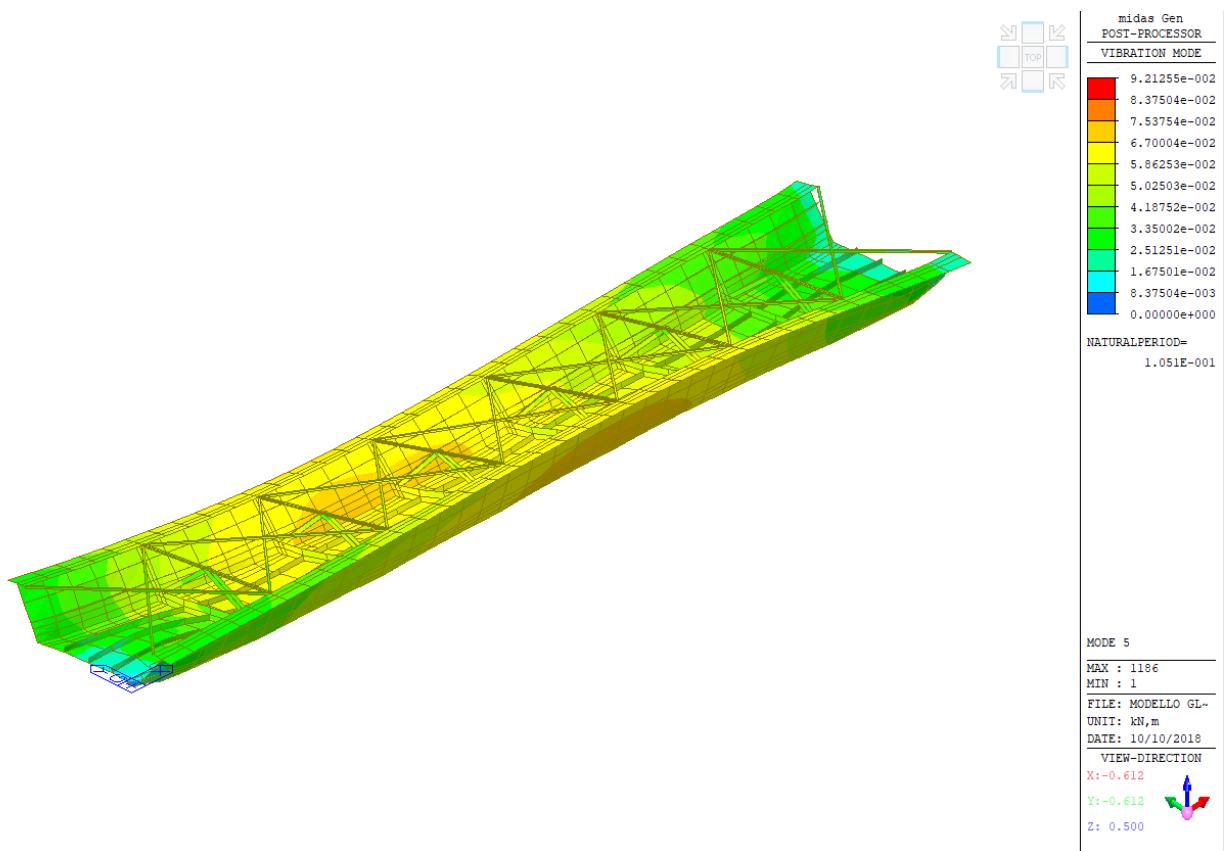


Figura 4.33 - Terzo modo di vibrare trasversale – $T=0.11\text{ s}$

4.3.2 Lunghezza di campata tipo: 35m - 5 campate continue

Le caratteristiche geometrico-costitutive sono:

- Cassone alto m 1,75 (L/20);
- Infittimento irrigidimenti piatabanda inferiore in zona di appoggio;
- Soletta collaborante in calcestruzzo armato 300 mm;
- Traversi in struttura reticolare interasse m 5;
- Controventi superiori provvisori per assicurare il comportamento rigido durante l'esecuzione.
- 175 m - Iperstatico - Soluzione a cassone chiuso

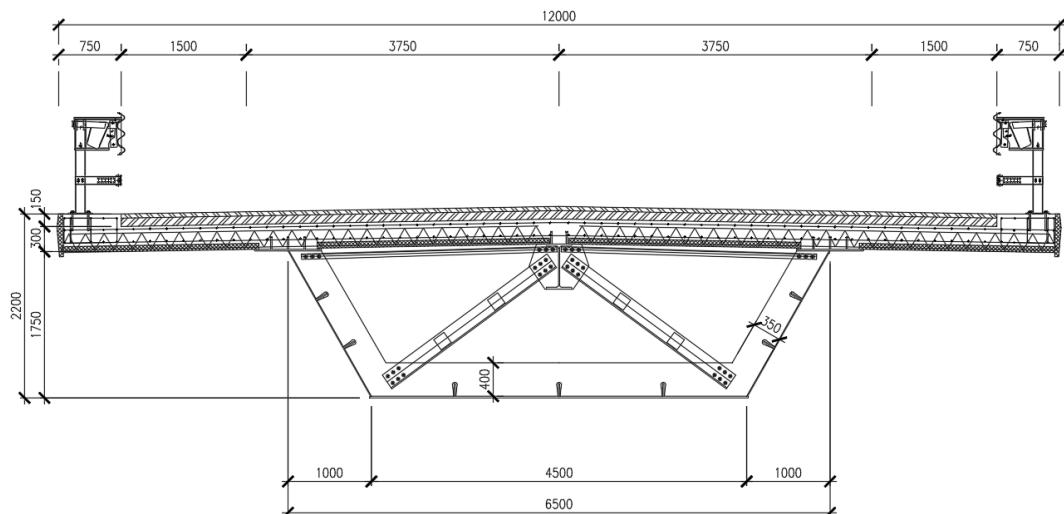


Figura 4.34 – Sezione tipo

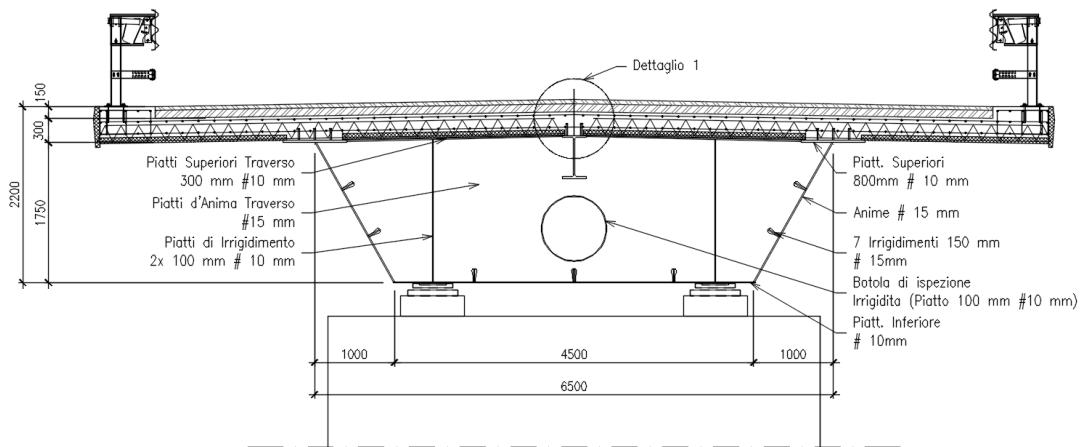


Figura 4.35 – Sezione all'appoggio

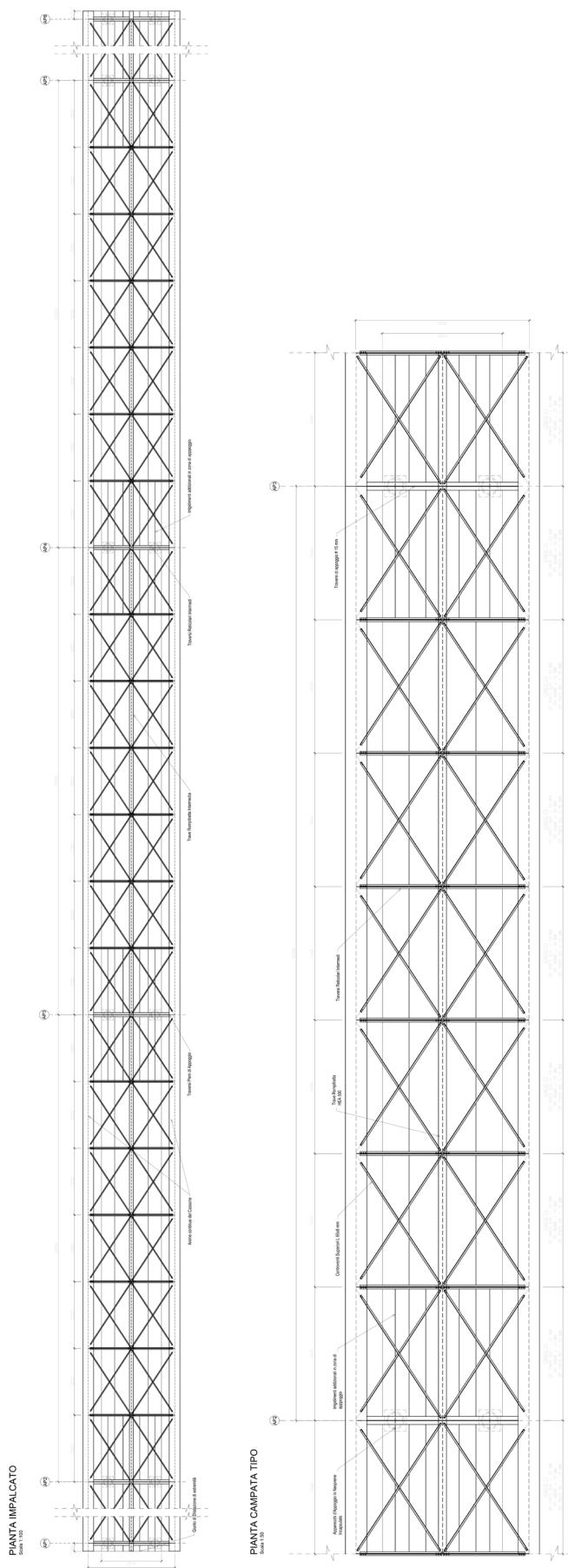


Figura 4.36 – Pianta tipo e Sezione longitudinale



Figura 4.37 – Modello 3D soluzione di trave a cassone con schema a trave continua

Figura 4.38 - Modello 3D soluzione di trave a cassone con schema a trave continua

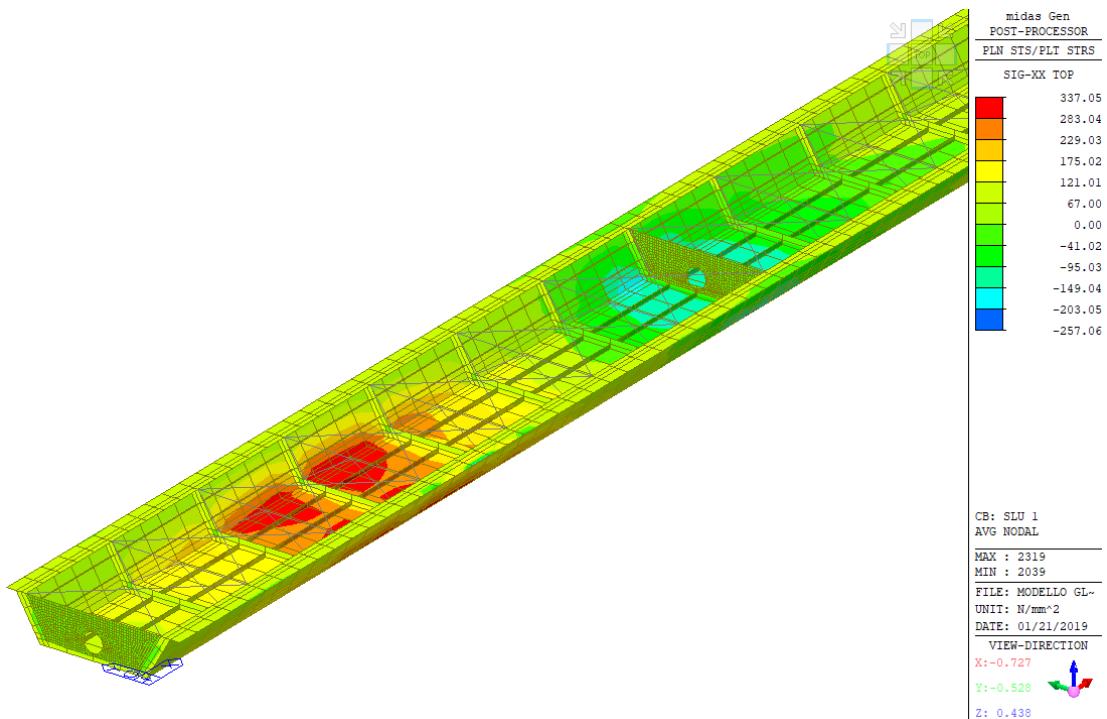
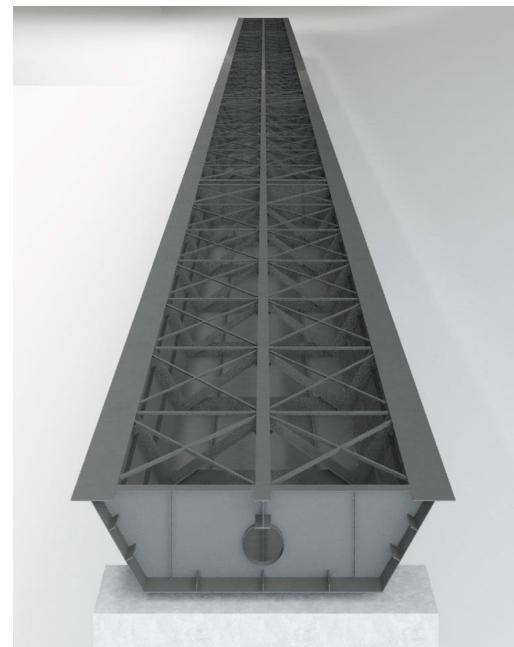


Figura 4.39 - Massime tensioni per flessione SLU

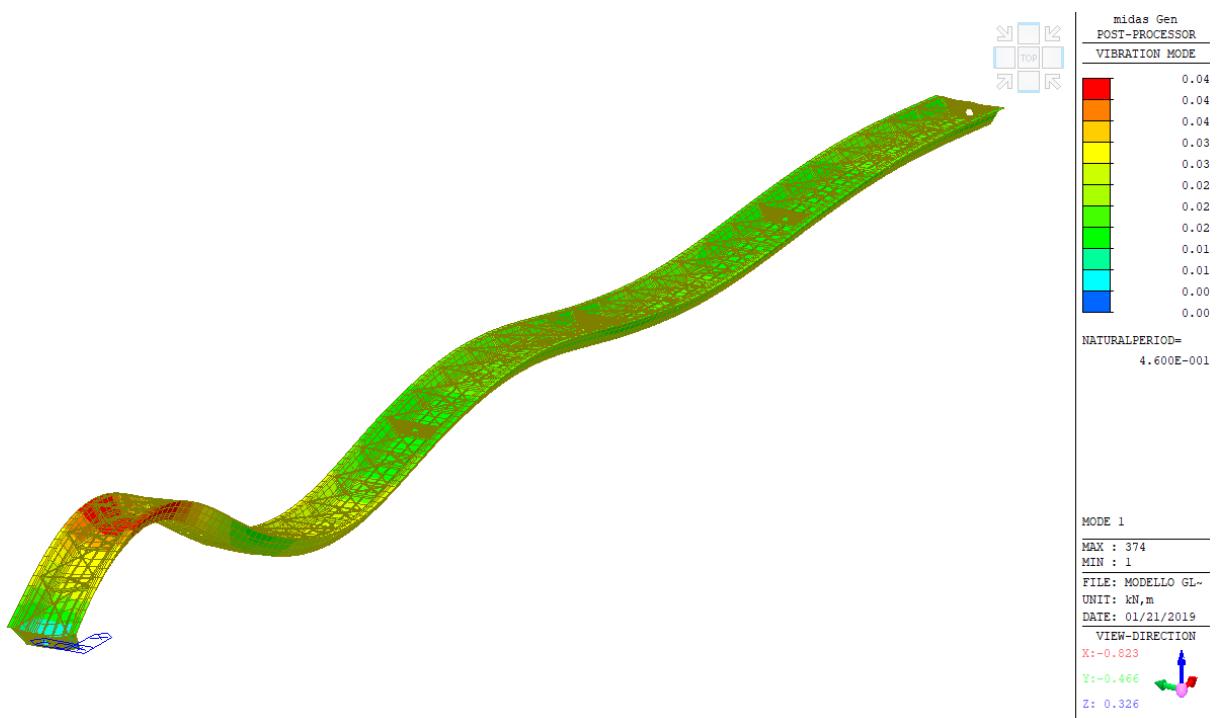


Figura 4.40 - Primo modo di vibrare, verticale $T=0,46$ s

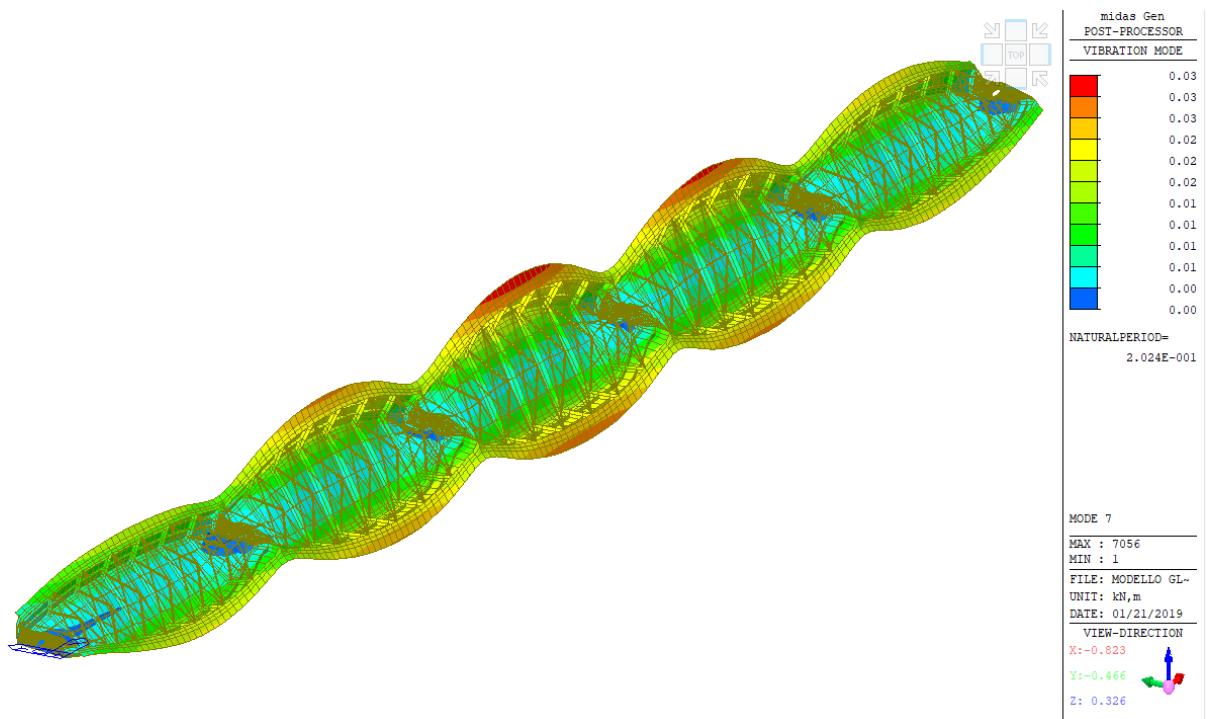


Figura 4.41 - Settimo modo di vibrare, torsionale $T=0,20$ s

I modelli ad elementi finiti per le soluzioni con travi a cassone chiuso sono stati sviluppati attraverso il software Midas gen®. Anime e piattabande sono state modellate attraverso elementi piani, mentre i controventi con elementi monodimensionali.

4.3.3 Esempi realizzativi

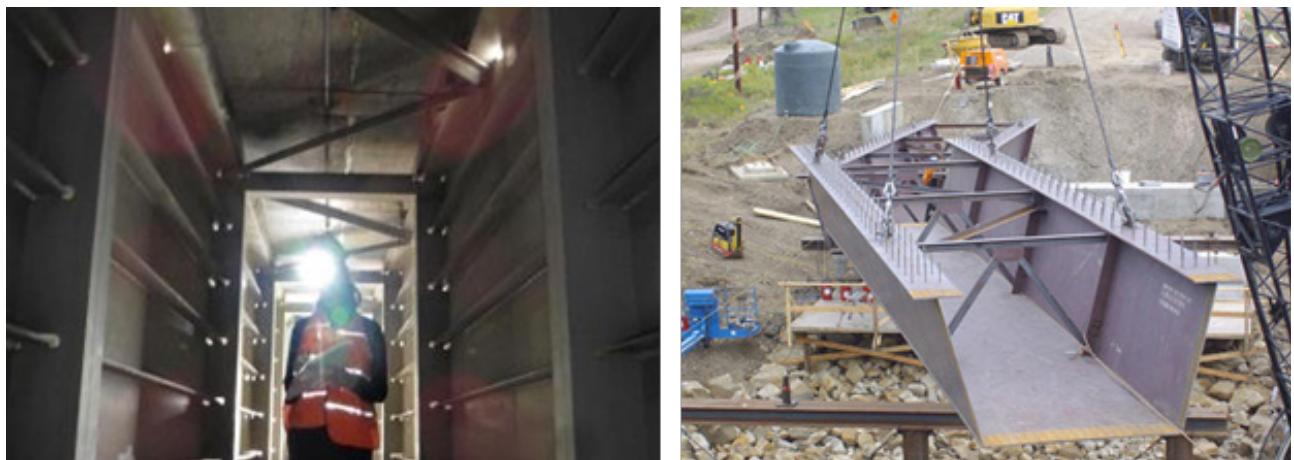


Figura 4.39 - Immagini di cantiere

Per la soluzione con travi a cassone chiuso è di fondamentale importanza prevedere dei fori di ventilazione per evitare i ristagni di umidità. Di seguito si riportano due dettagli dei fori:

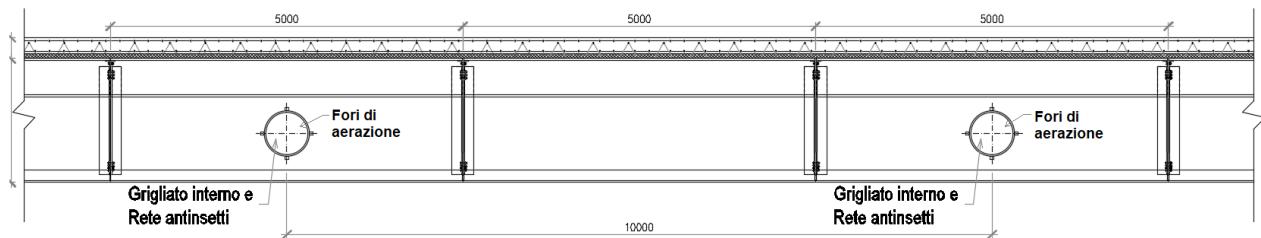


Figura 4.43 – Dettaglio in sezione longitudinale del foro di aerazione

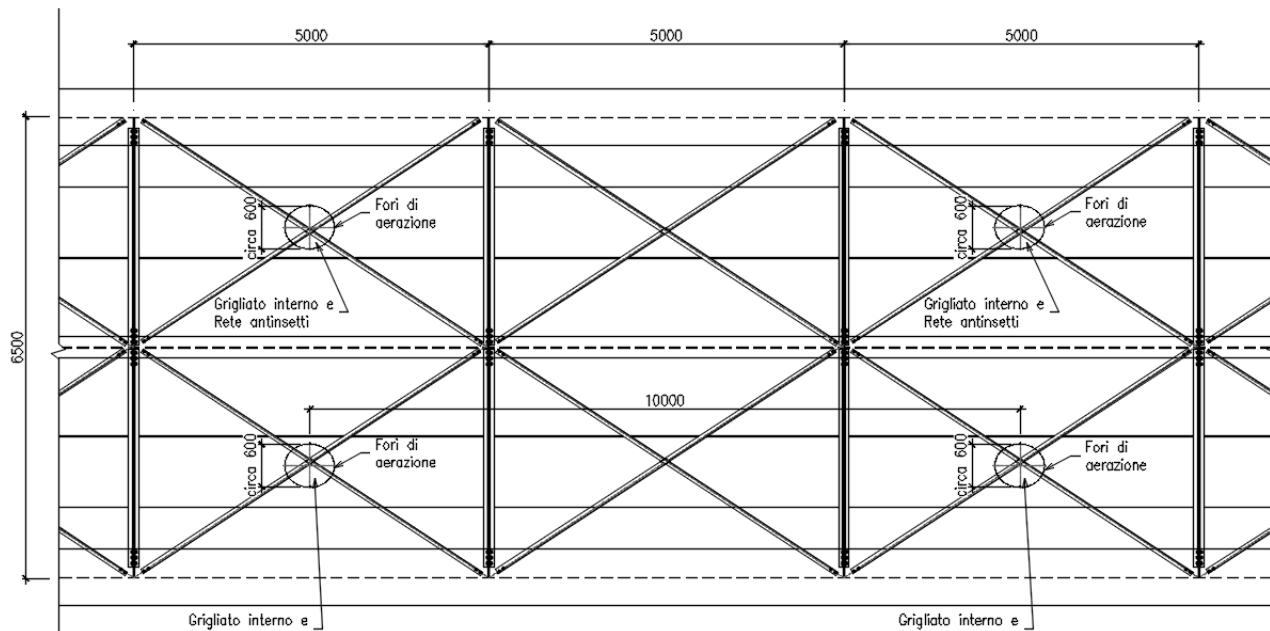


Figura 4.44 – Vista in pianta dei fori di aerazione

Dati di sintesi

Impalcato: m 35 x 12

- Tipologia: a cassone chiuso (rif. Disegno 5A):
- Carpenteria Metallica: 160 kg/m²
- Acciaio S355 - $f_{yk} = 355$ MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - $f_{ck} = 30$ MPa;

• Impalcato: m 175 x 12

- Tipologia: a cassone chiuso, trave continua (rif. Disegno 5B):
- Peso della carpenteria Metallica: 150 kg/m²
- Acciaio S355 - $f_{yk} = 355$ MPa;
- Calcestruzzo C30/37 - $f_{ck} = 30$ MPa;

4.4 Esempi di soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

4.4.1 Lunghezza di campata tipo: 25m

Le caratteristiche geometrico-costitutive sono:

- Schema bi-trave con travi a doppio "T" di altezza pari a 1.60 m a parete piena ricavata da piatti saldati.
- Traversi in elementi saldati a doppio "T", altezza variabile da 500 mm a 600 mm, interasse 3 m e sbalzi laterali da 200 mm a 500 mm di altezza.
- Soletta con lastre prefabbricate tipo predalles e getto in calcestruzzo armato collaborante 300 mm;

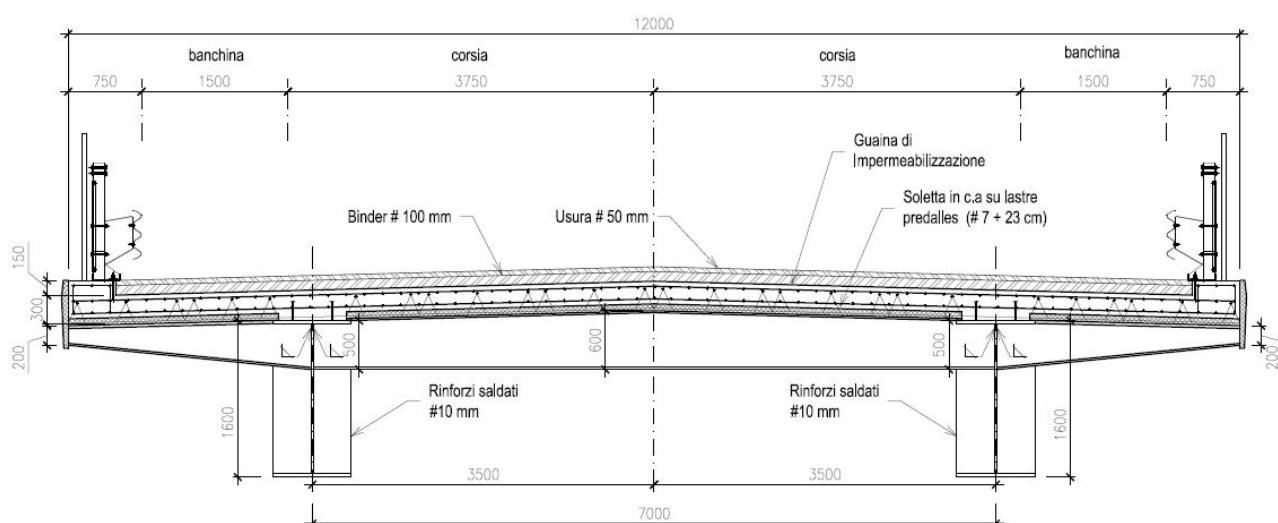
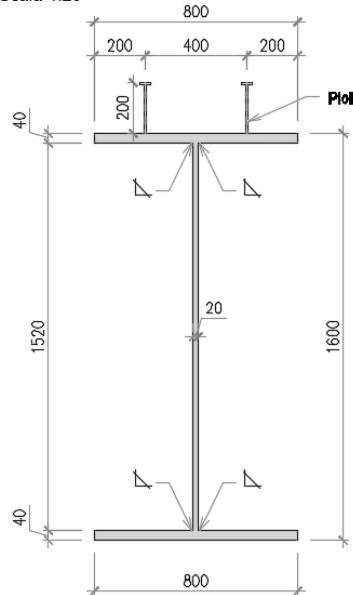


Figura 4.45 - Sezione tipo

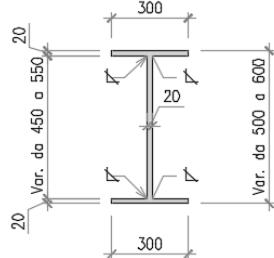
TRAVE tipo

Scala 1:20



TRAVERSO CENTRALE tipo

Scala 1:20



TRAVERSO a mensola tipo

Scala 1:20

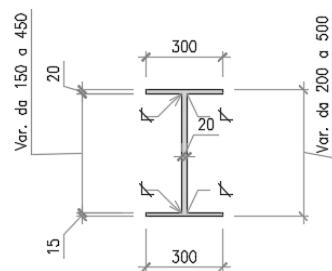


Figura 4.46 – Sezioni profili

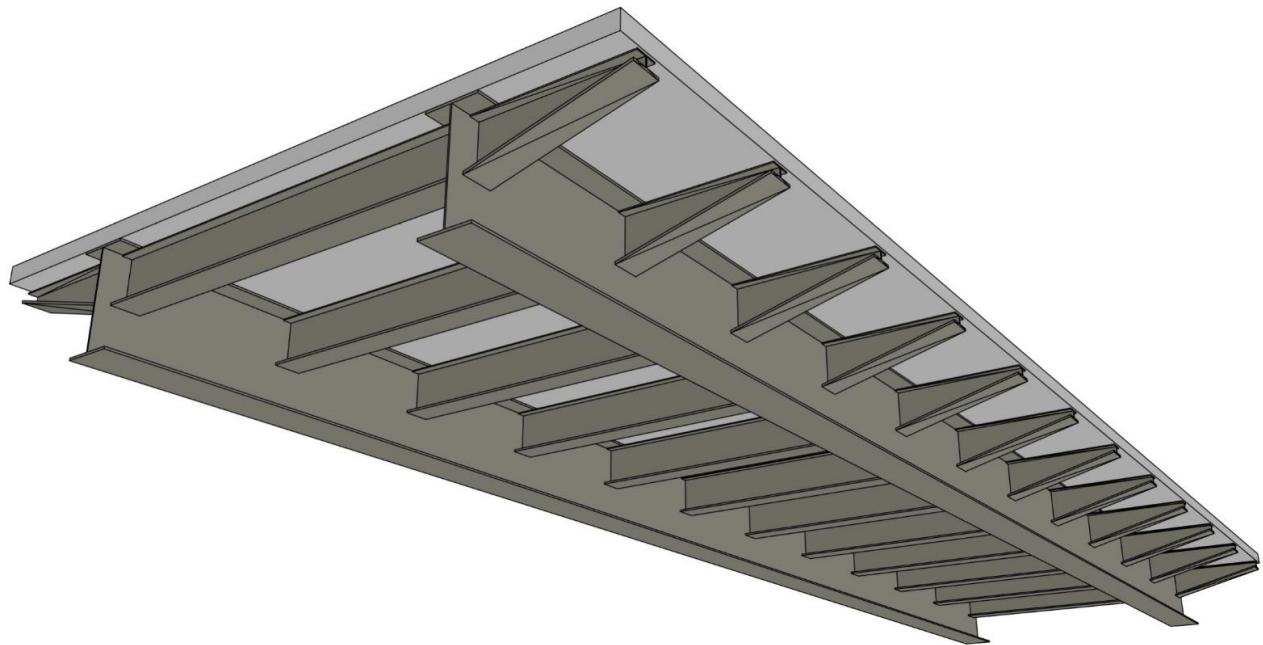


Figura 4.47 – Modello 3D

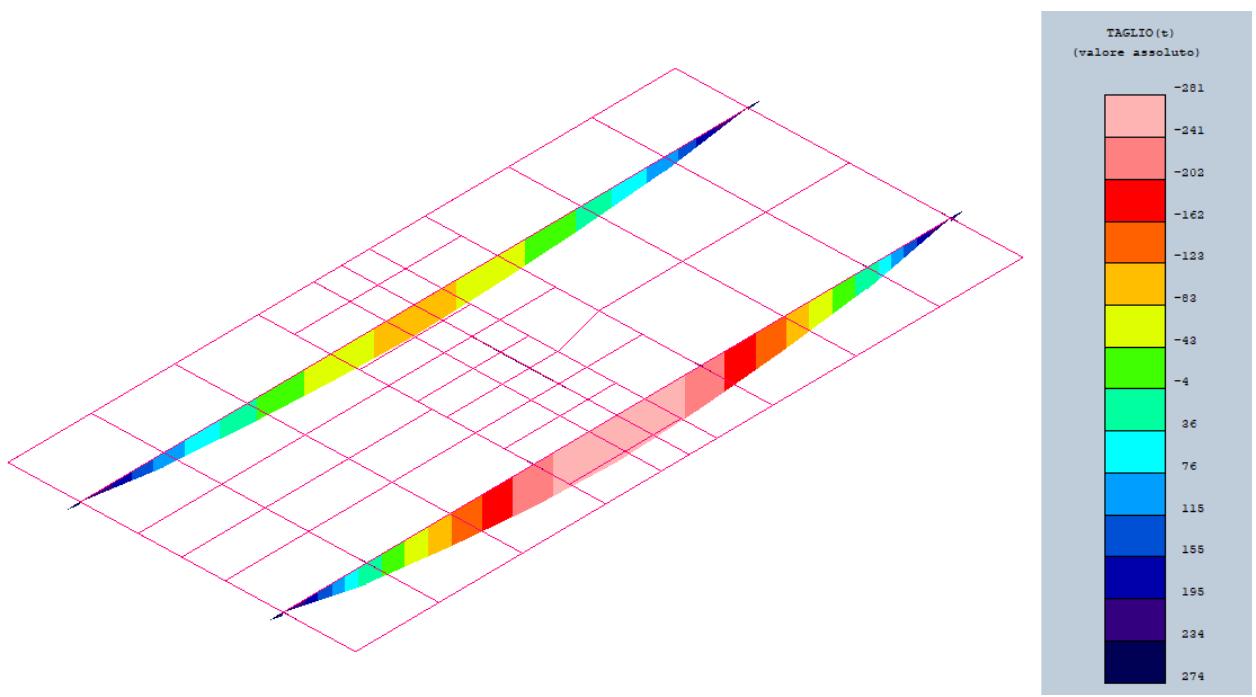


Figura 4.48 – Diagramma inviluppo dei momenti soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

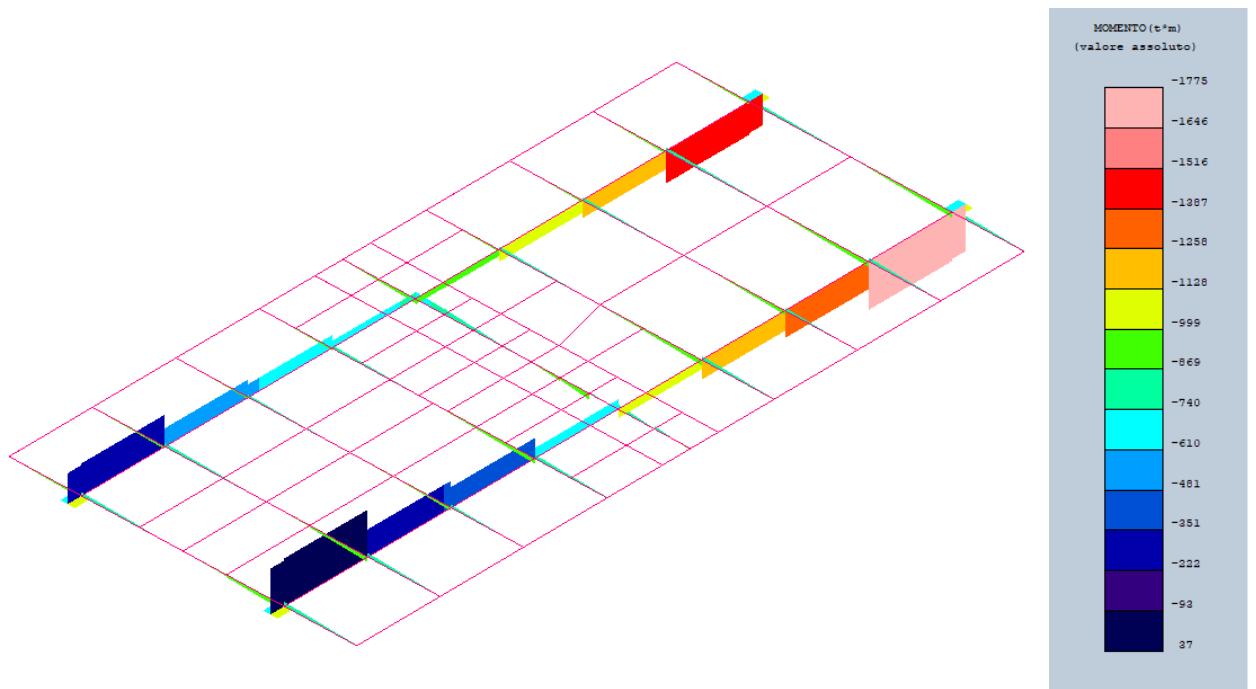


Figura 4.49 – Diagramma inviluppo di taglio soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

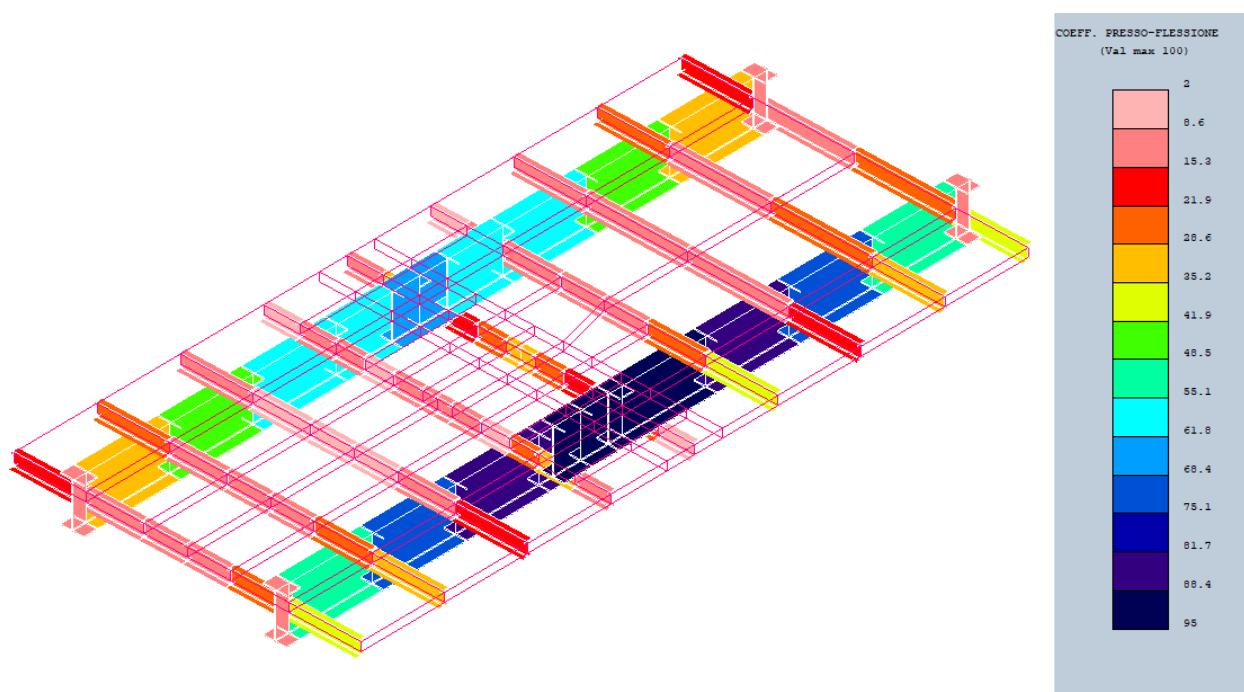


Figura 4.50 – Coefficiente di utilizzo presso-flessionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composita saldata

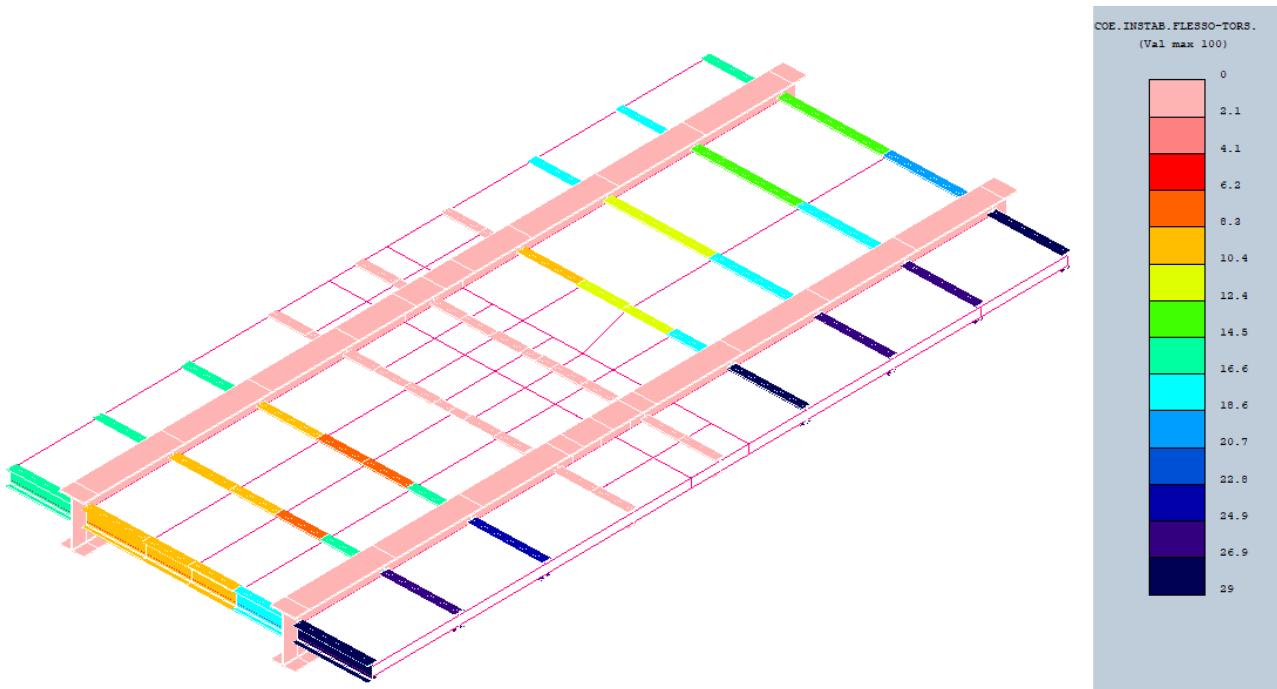


Figura 4.51 – Coefficiente di utilizzo flesso-torsionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composita saldata

4.4.2 Lunghezza di campata tipo: 35m

Le caratteristiche geometrico-costitutive sono:

- Schema bi-trave con travi a doppio "T" di altezze che variano da 1.90m a 2.10 m a parete piena ricavata da piatti saldati.
- Traversi in elementi saldati a doppio "T", altezza variabile da 500mm a 600 mm, interasse 3 m e sbalzi laterali da 500 mm a 200 mm di altezza.
- Soletta con lastre prefabbricate tipo predalles e getto in calcestruzzo armato collaborante 300 mm;

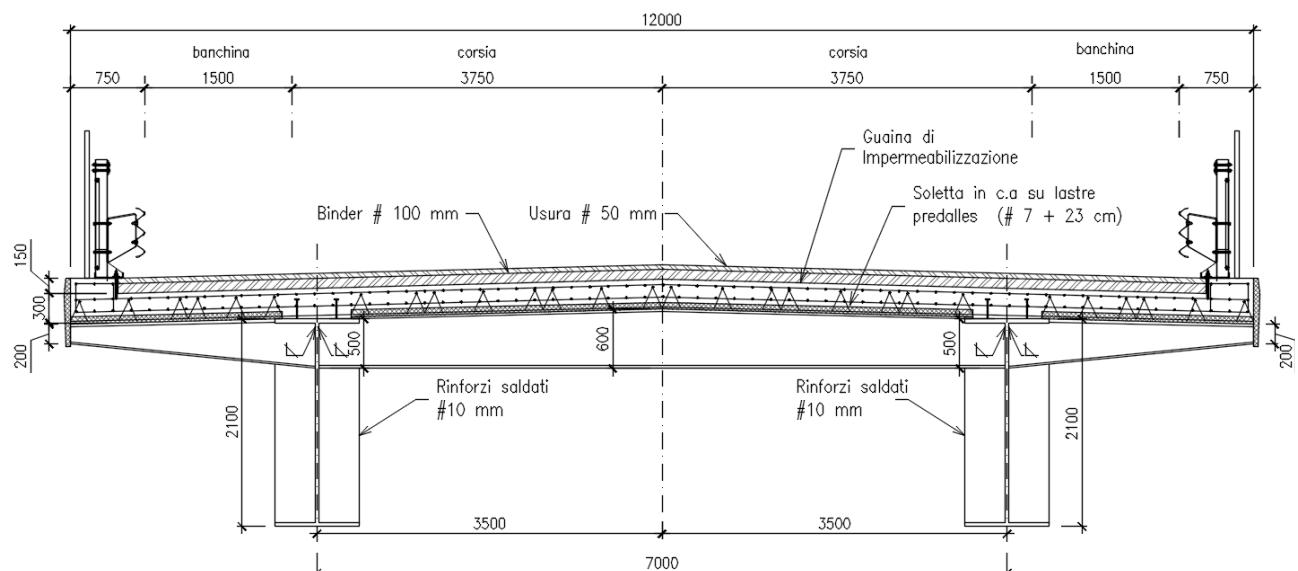
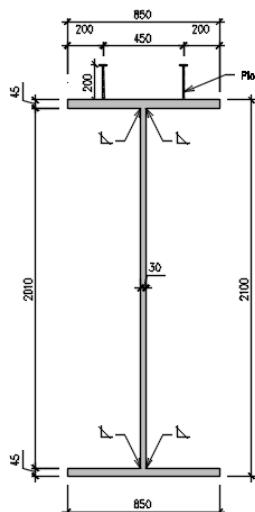


Figura 4.52 – Sezione tipo

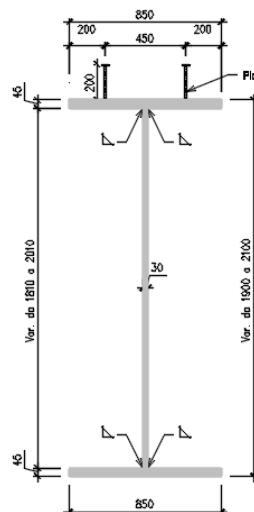
TRAVE CENTRALE tipo

Scala 1:20



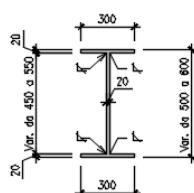
TRAVE tipo agli appoggi

Scala 1:20



TRAVERSO CENTRALE tipo

Scala 1:20



TRAVERSO a mensola tipo

Scala 1:20

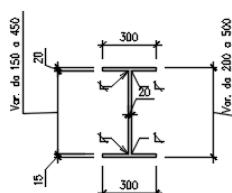


Figura 4.53 – Sezioni profili tipo

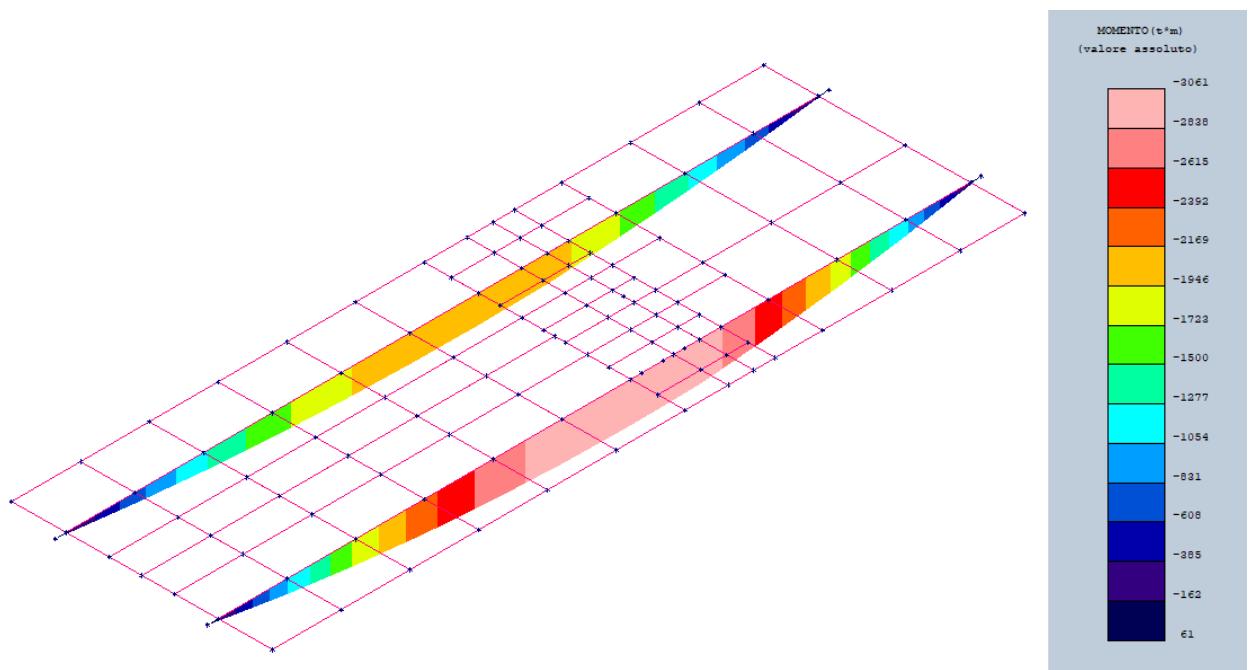


Figura 4.54 - Diagramma inviluppo dei momenti soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

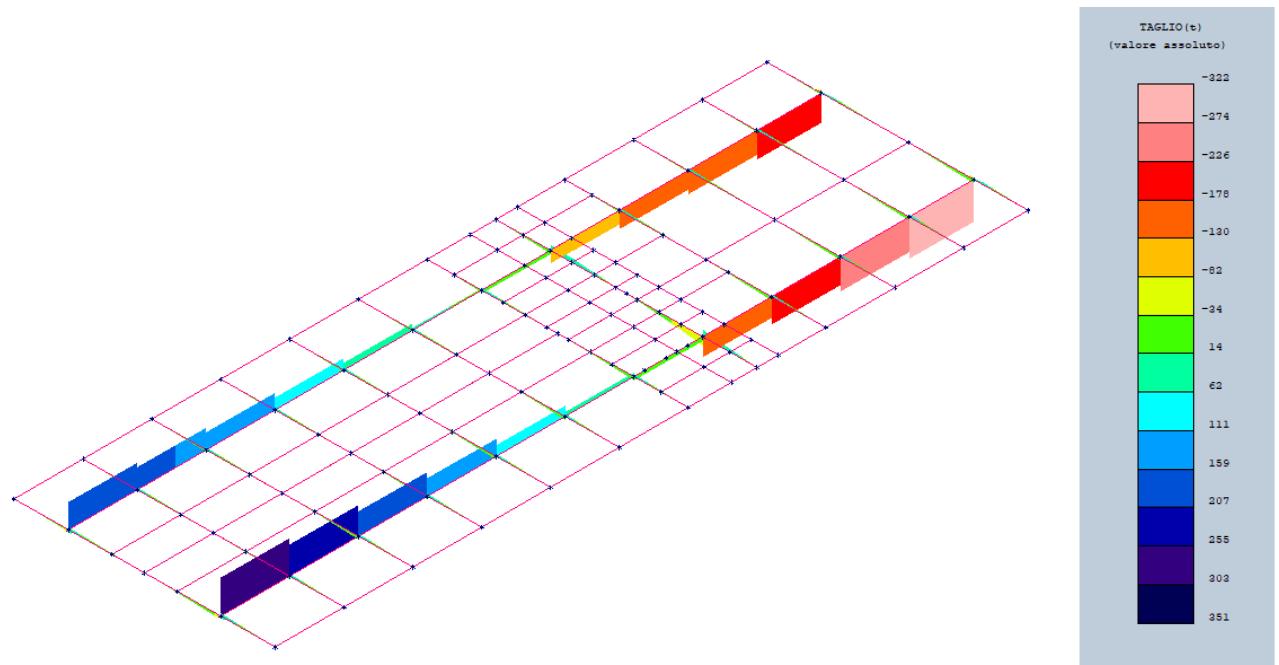


Figura 4.55 - Diagramma inviluppo di taglio soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

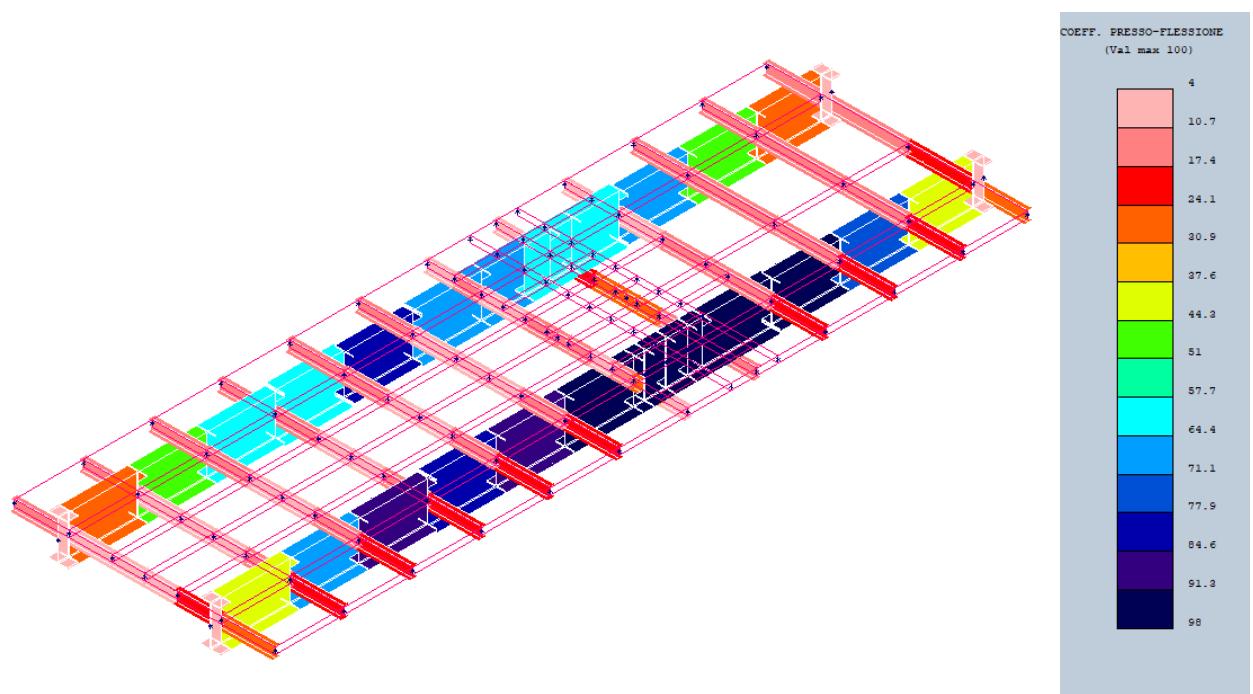


Figura 4.56 – Coefficiente di utilizzo presso-flessionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

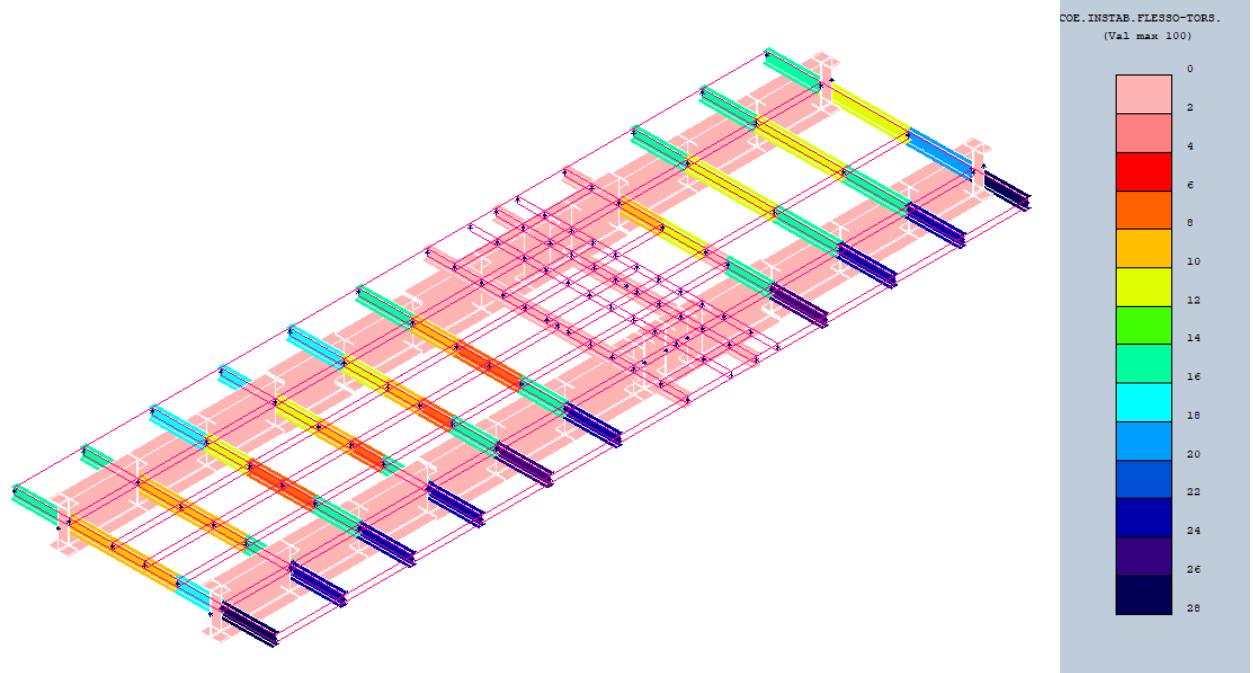


Figura 4.57 – Coefficiente di utilizzo flesso-torsionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

4.4.3 Lunghezza di campata tipo: 25 m - 5 campate continue

125 m - Iperstatico - Soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

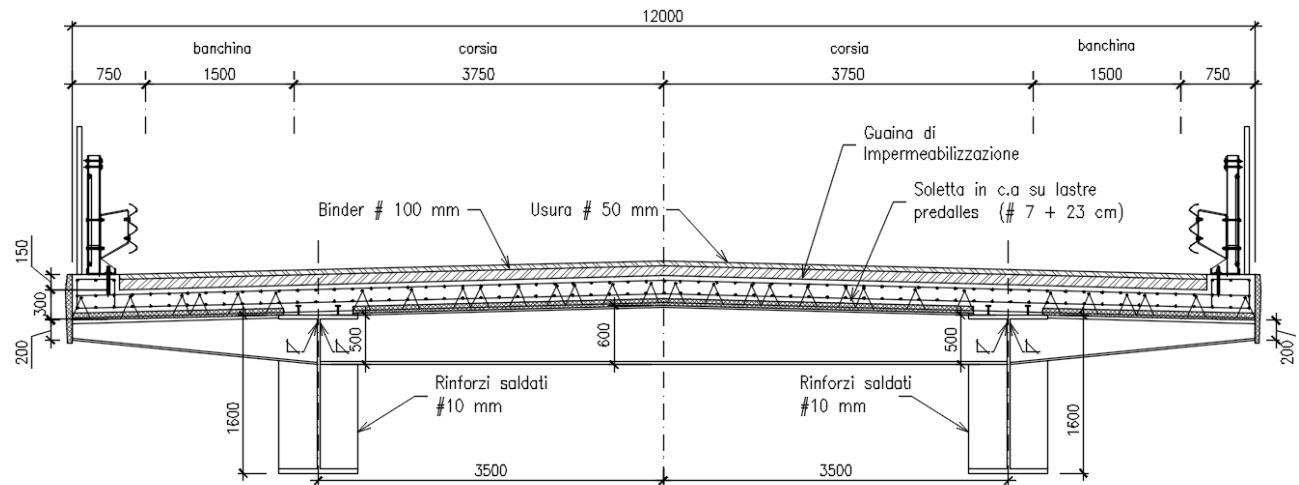
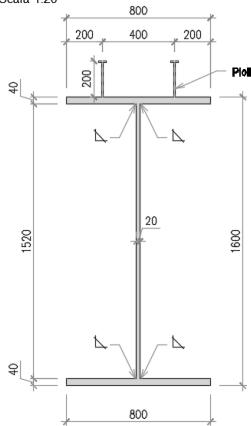


Figura 4.58 – Sezione tipo

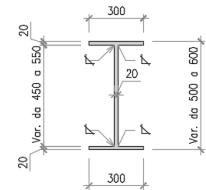
TRAVE tipo

Scala 1:20



TRAVERSO CENTRALE tipo

Scala 1:20



TRAVERSO a mensola tipo

Scala 1:20

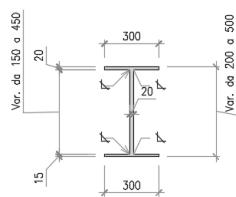


Figura 4.59 – Sezioni profili tipo

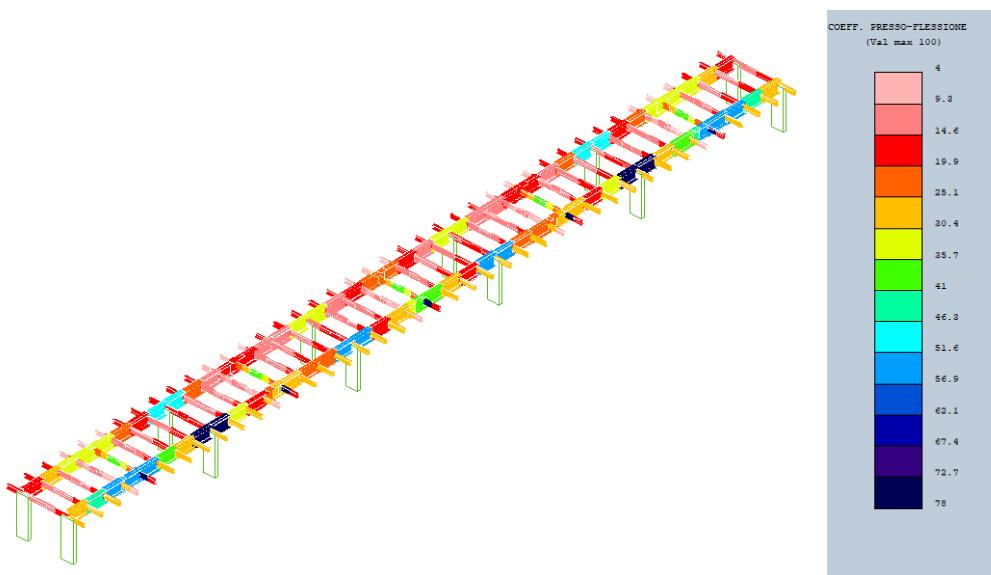


Figura 4.60 – Coefficiente di utilizzo presso-flessionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

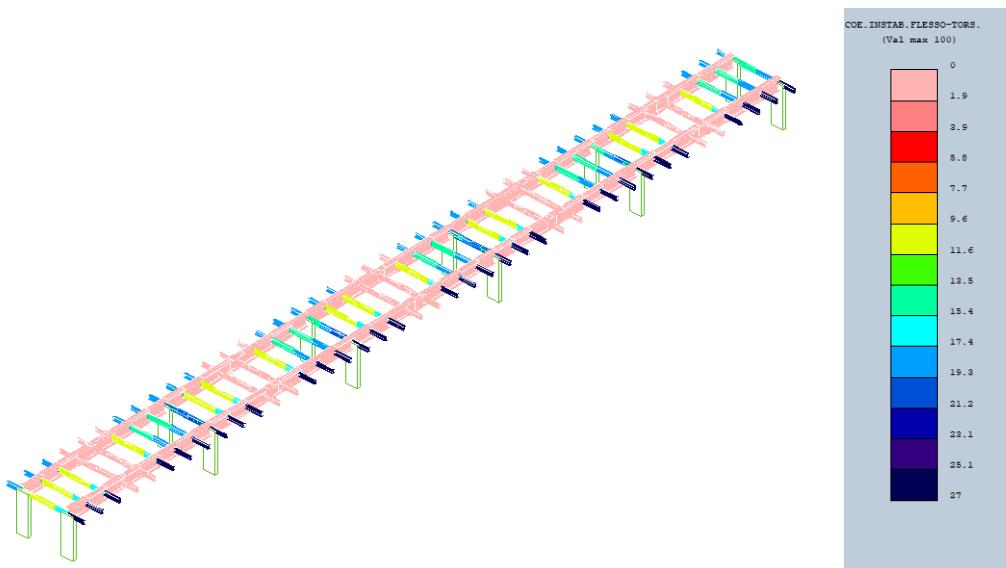


Figura 4.61 – Coefficiente di utilizzo flesso-torsionale soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

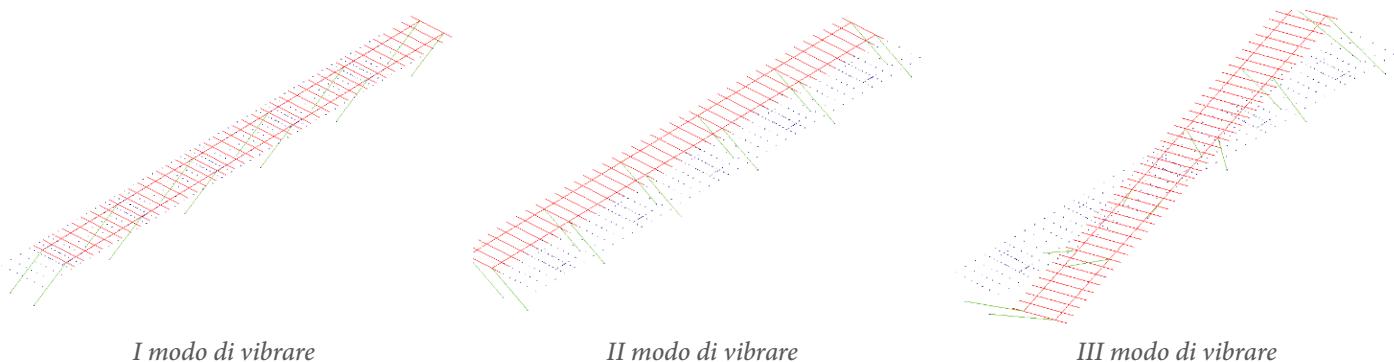


Figura 4.62 – Rappresentazione dei primi tre modi di vibrare soluzione tipo Travi a doppio T, bi-trave lamiera composta saldata

I modelli ad elementi finiti per le soluzioni multi-trave con profilo laminato sono stati sviluppati attraverso il software STS-CDS Win®.

4.4.4 Esempi realizzativi

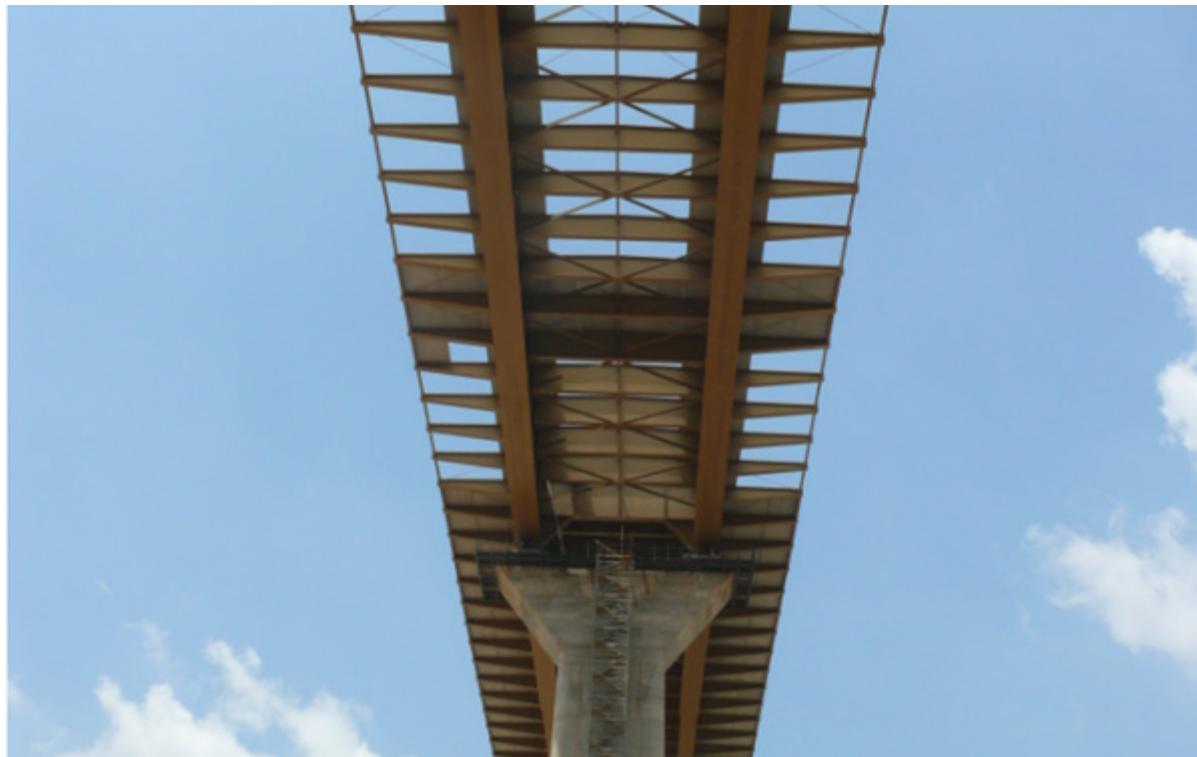


Figura 4.63 – Esempi di ponte di soluzione con travi a doppio T da lamiera saldata

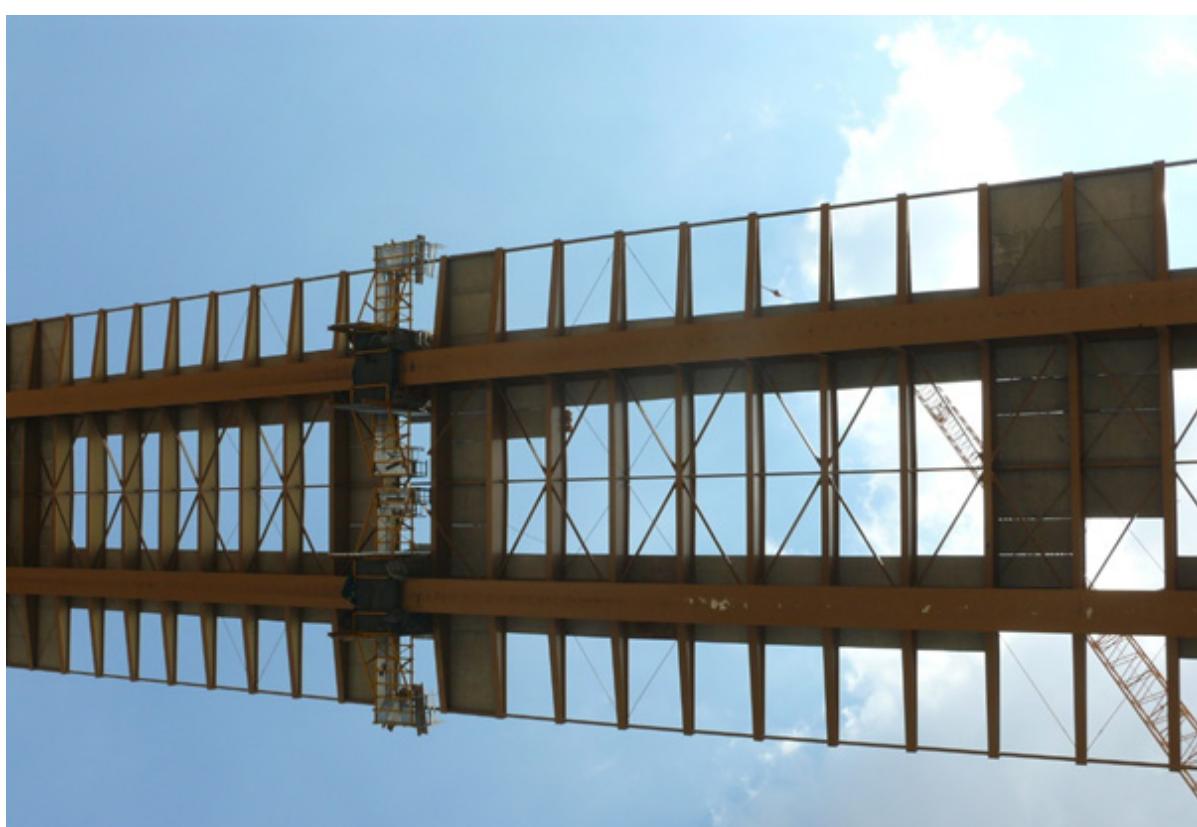


Figura 4.64 – Esempi di ponte di soluzione con travi a doppio T da lamiera saldata



Figura 4.65 – Esempi di ponte di soluzione con travi a doppio T da lamiera saldata

Dati di sintesi

- Impalcato: m 25 x 12
- Tipologia: bi-trave doppio T saldate, con traversi trasversali a doppio T
Schema isostatico (rif. Disegno 6A)
- Peso della carpenteria Metallica: 210 kg/m²
- Acciaio S355 - $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;

- Impalcato: m 35 x 12
- Tipologia: bi-trave doppio T saldate, con traversi trasversali a doppio T
Schema isostatico (rif. Disegno 6B)
- Peso della carpenteria Metallica: 260 kg/m²
- Acciaio S355 - $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;

- Impalcato: m 125 x 12 – 5 campate continue di 25 m
- Tipologia: bi-trave doppio T saldate, con traversi trasversali a doppio T
Schema iperstatico (rif. Disegno 6C)
- Peso della carpenteria Metallica: 210 kg/m²
- Acciaio S355 - $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;

4.5 Esempi di soluzione a travata reticolare con profili tubolari a sezione circolare

Premesso che la soluzione con travi reticolari apre ad innumerevoli possibilità, date dalle diverse geometrie dei profili in acciaio disponibili sul mercato. Si è previsto di realizzare le travature reticolari mediante l'utilizzo di profili tubolari, invece di una trave reticolare mediante profili aperti, per presentare una tipologia di soluzione che propone una caratteristica architettonica che si scosta in modo netto dalle soluzioni di impalcato a cassone o con profili a doppio T, saldati o laminati.

I seguenti esempi sono relativi alla soluzione con profili tubolari collegati mediante saldatura, ma si anticipa che una simile soluzione potrebbe essere realizzata anche attraverso collegamenti bullonati.

4.5.1 Lunghezza di campata tipo: 25m

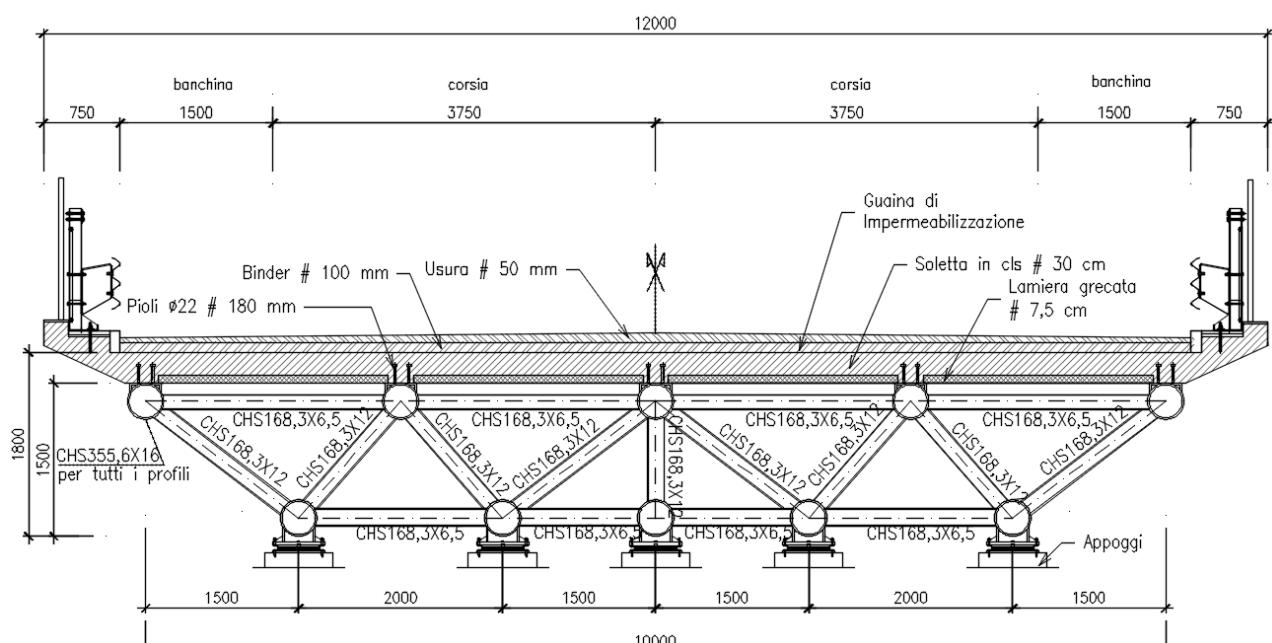


Figura 4.66 - Sezione Tipo

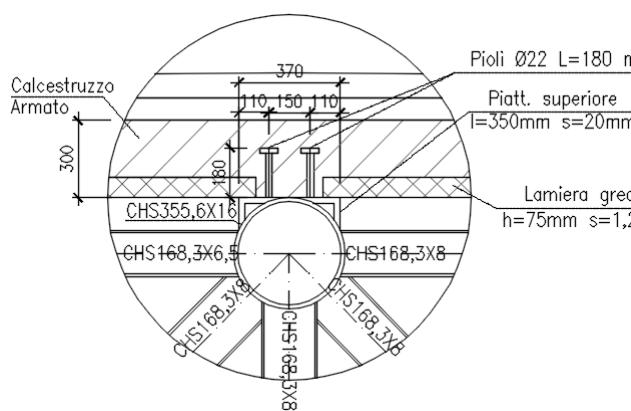
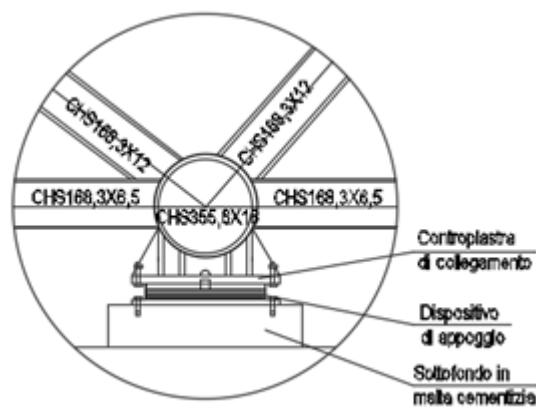


Figura 4.67 - Dettaglio soletta



dettaglio appoggio

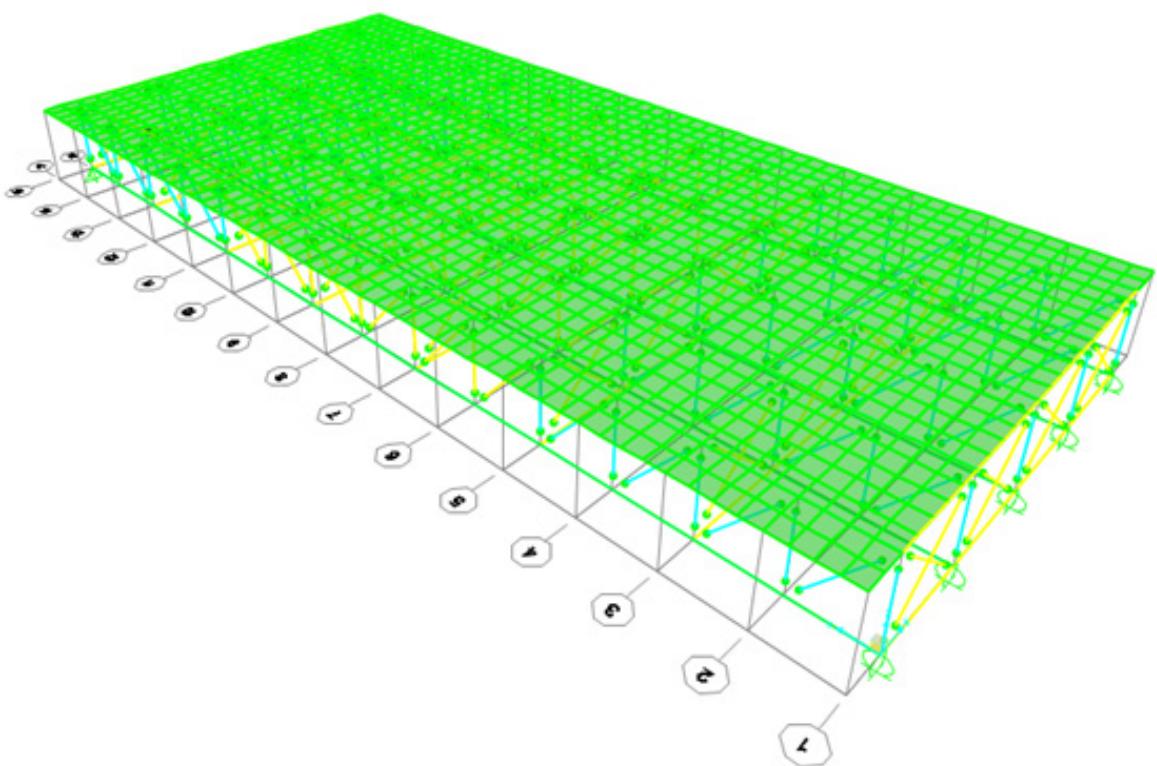


Figura 4.68 – Modello analitico

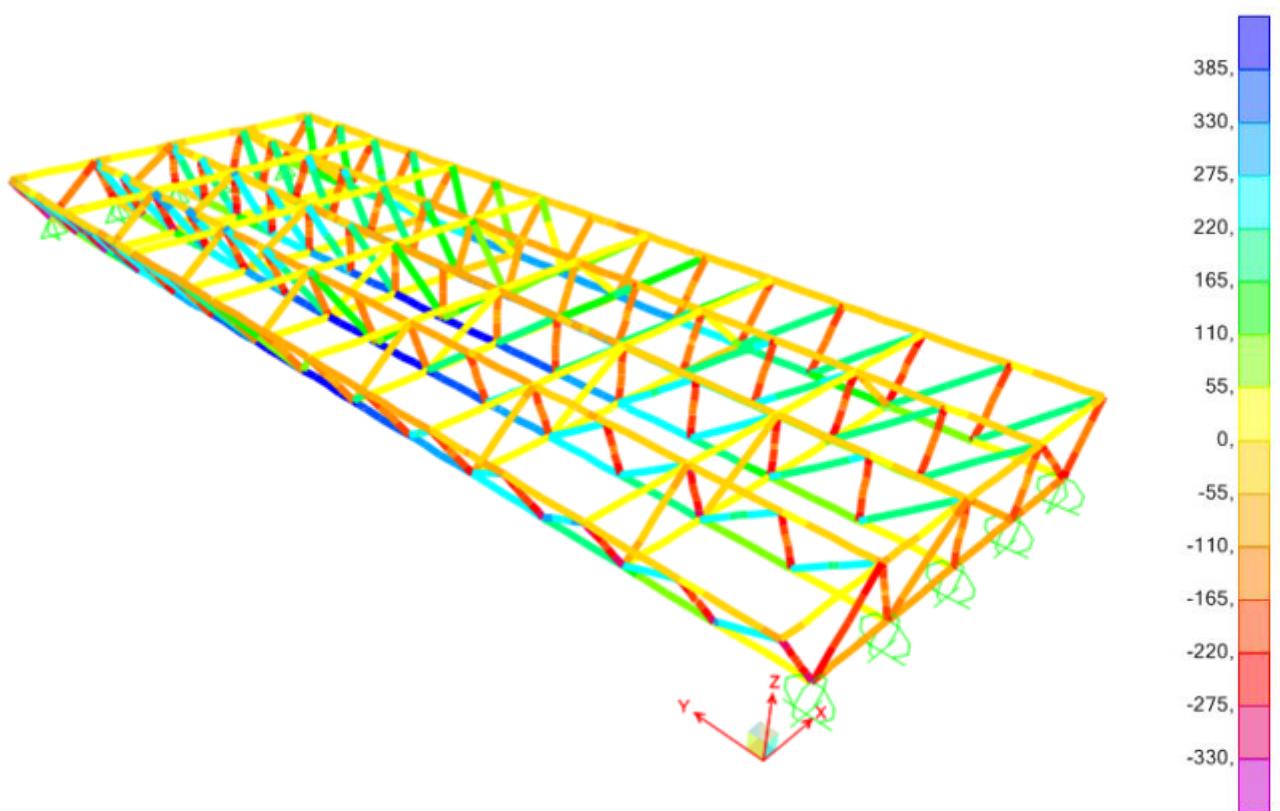


Figura 4.69 - Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in campata

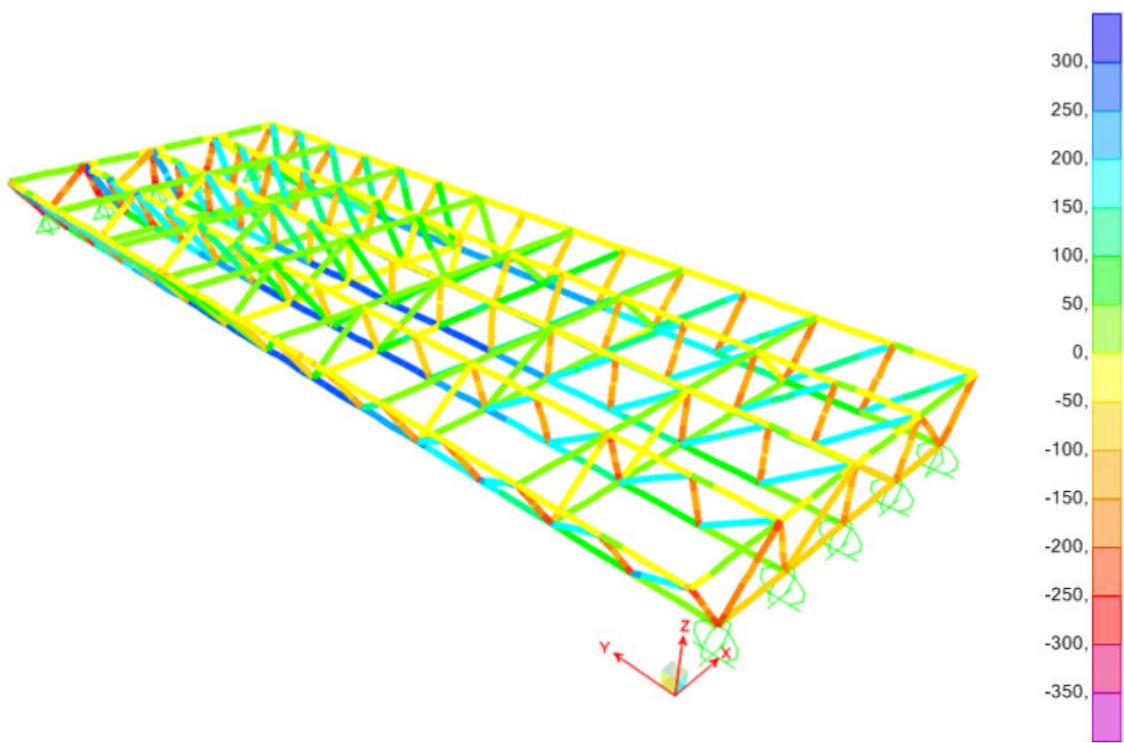


Figura 4.70 - Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in appoggio

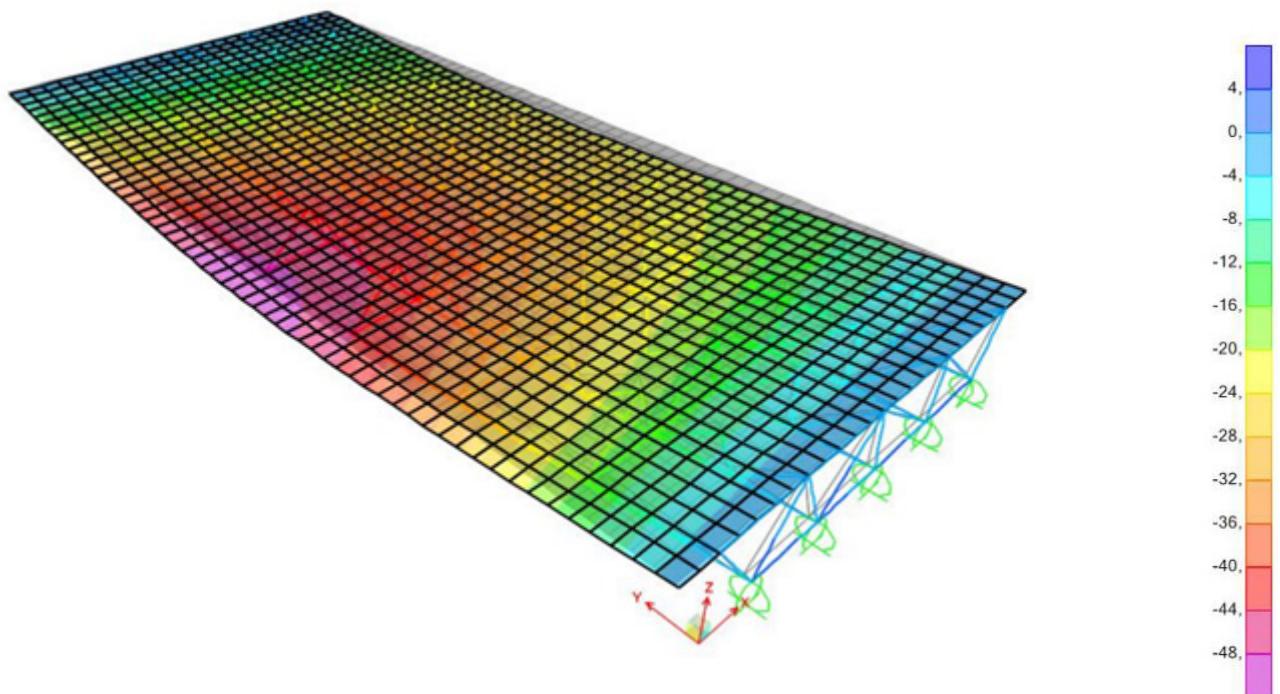


Figura 4.71 - Spostamenti verticali [mm] - Combinazione SLE
 $f_{max} = 50.9 \text{ mm}$; $f_{lim} = L/400 = 62.5 \text{ mm}$

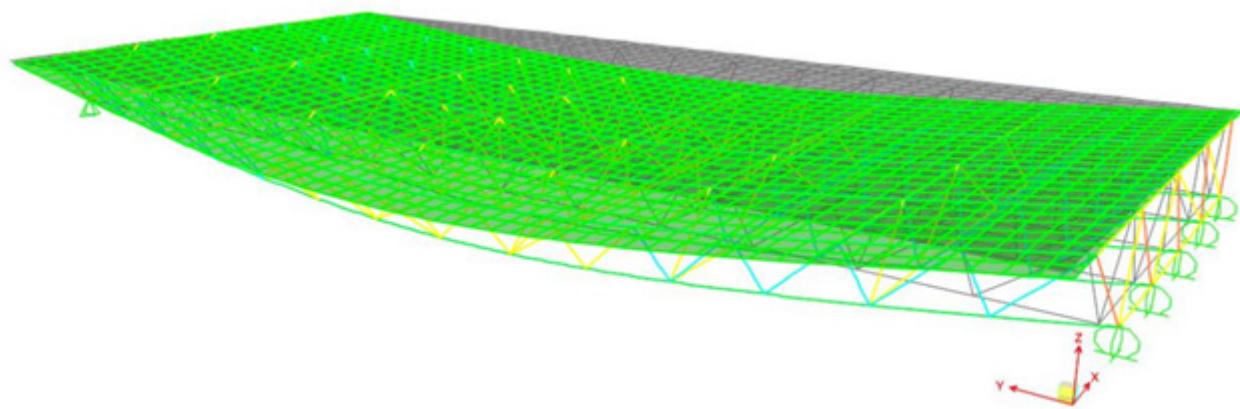


Figura 4.72 - Modo 1 - $T=0.49s$; $f=2.01Hz$;

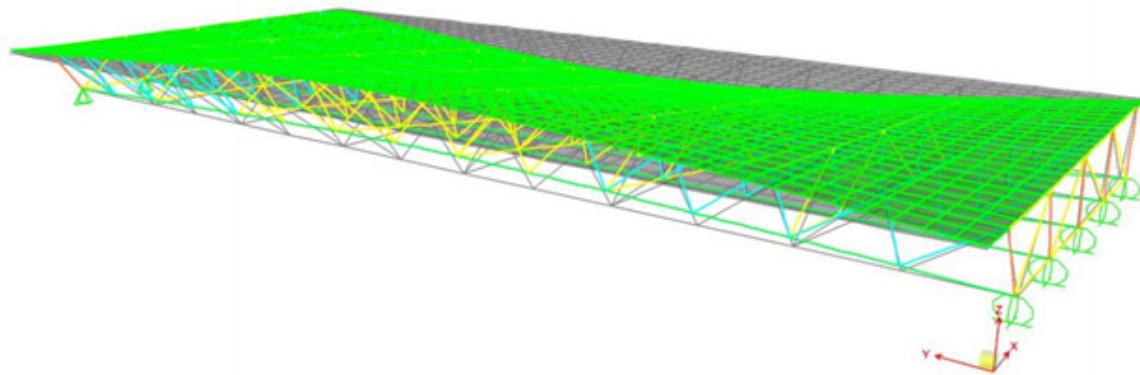


Figura 4.73 - Modo 2 - $T=0.33s$; $f=3.03Hz$;

4.5.2 Lunghezza di campata tipo: 35m

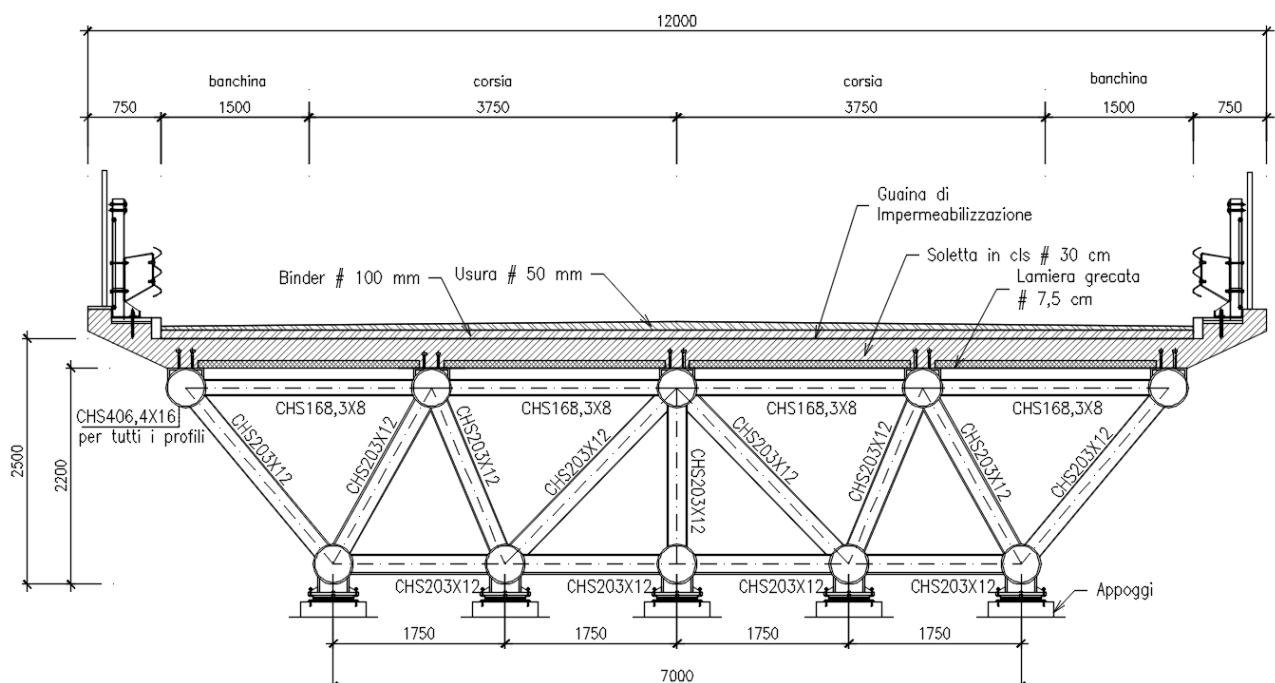


Figura 4.74 – Sezione tipo

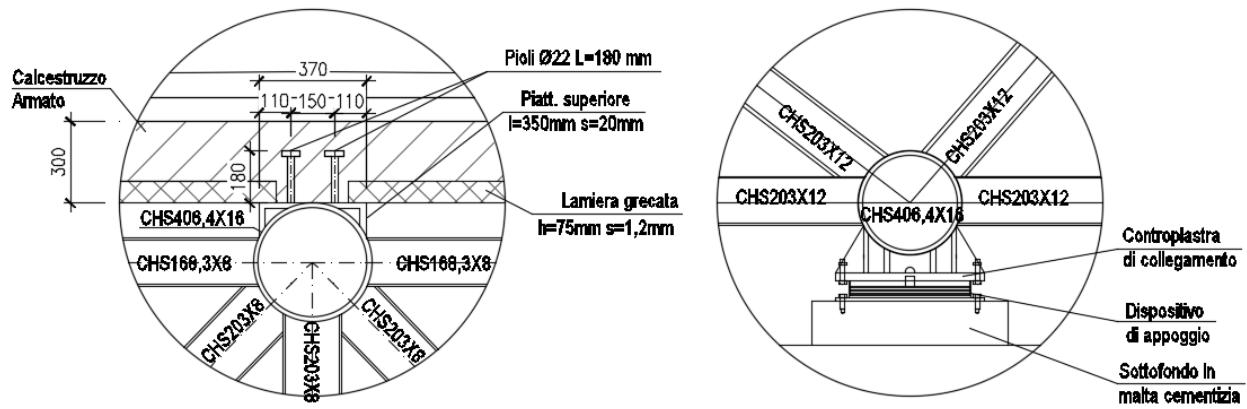


Figura 4.75 - Dettaglio soletta

dettaglio appoggio

È possibile creare un traverso in c.a. dove ancorare le travi longitudinali e ridurre il numero di appoggi sotto il traverso da cinque a tre.

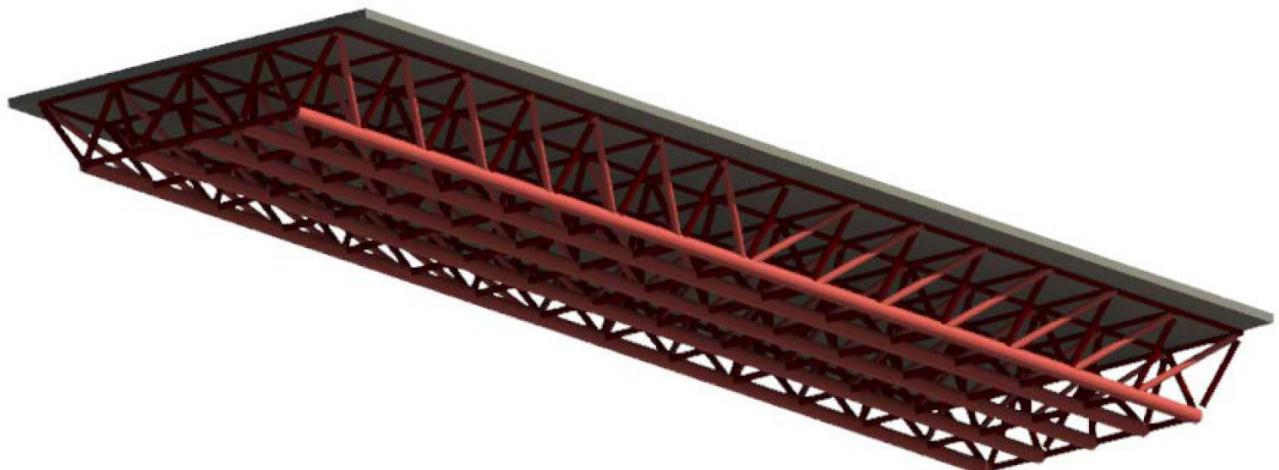


Figura 4.76 – Modello 3D

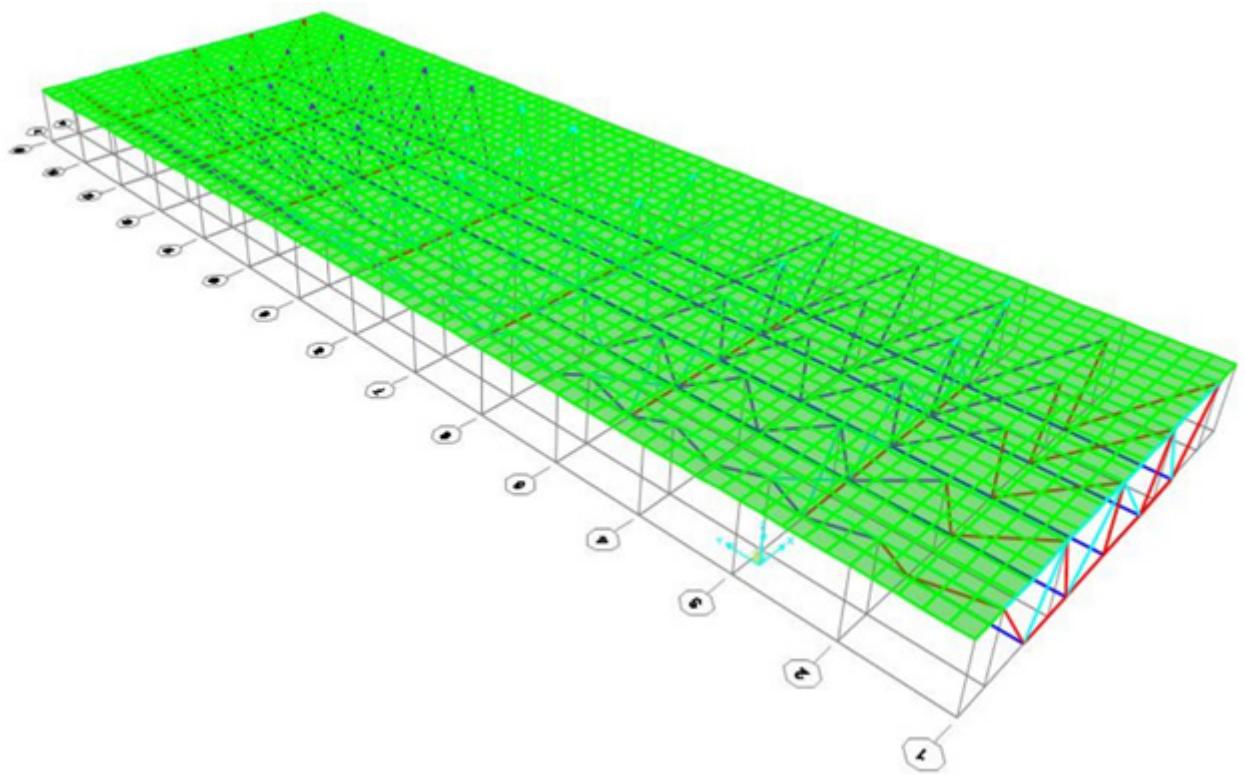


Figura 4.77 - Modello analitico

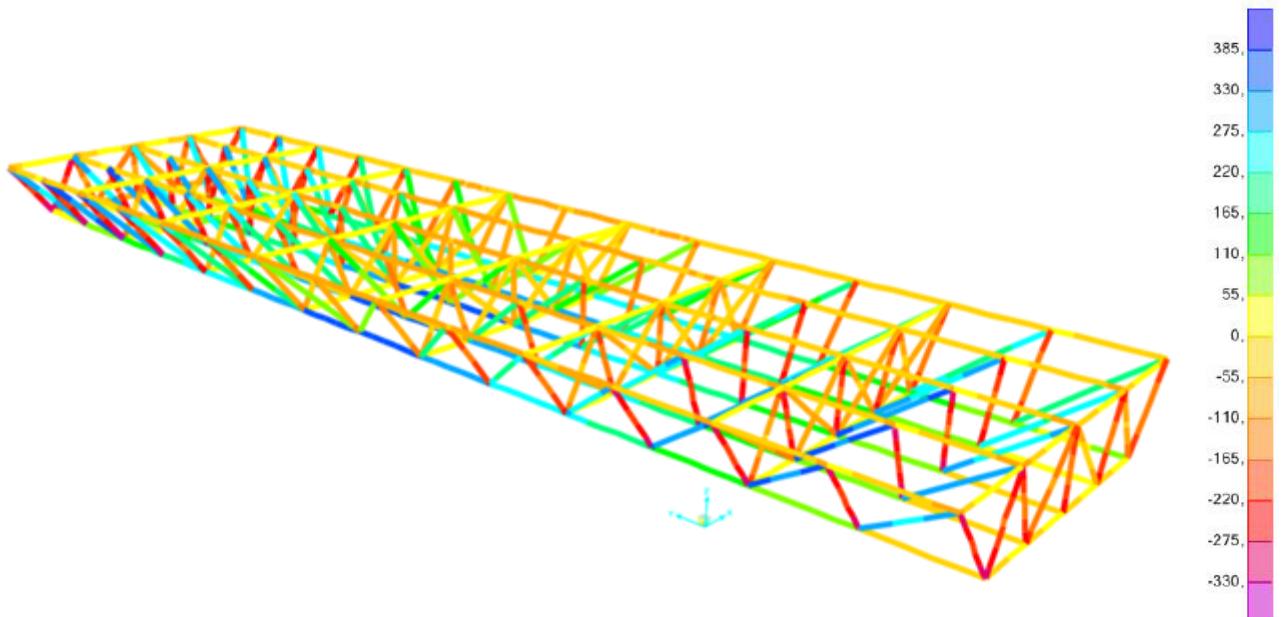


Figura 4.78 – Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in campata

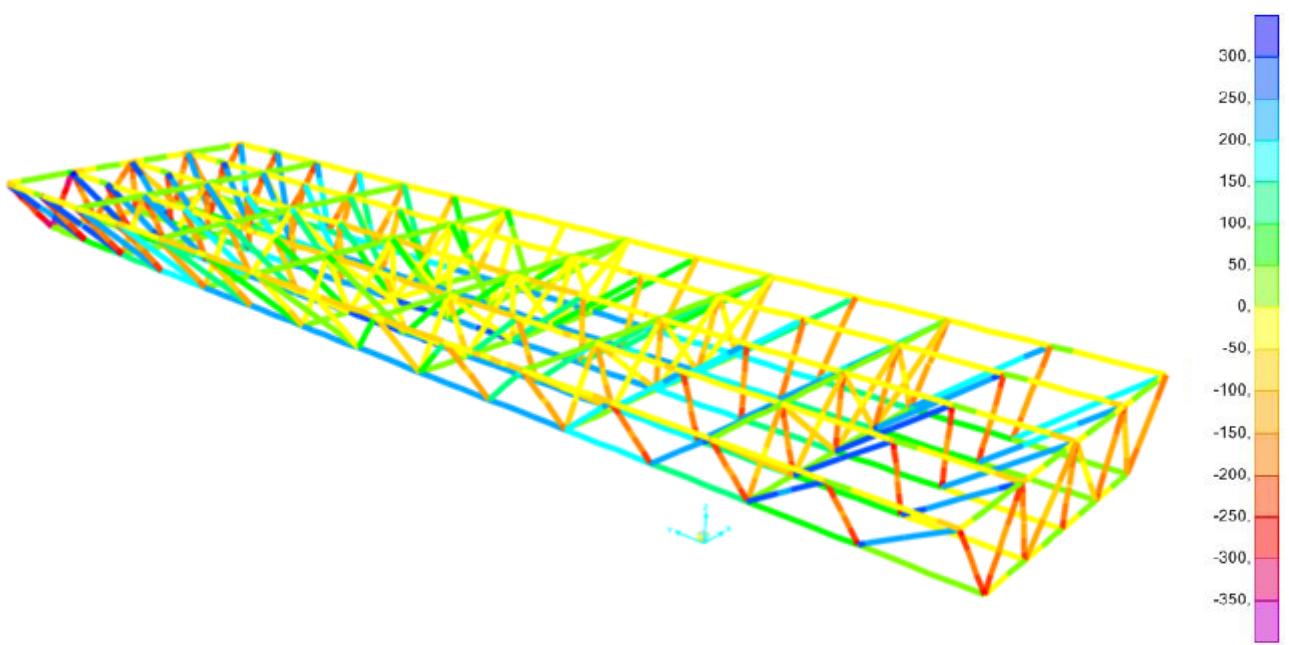


Figura 4.79 - Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in appoggio

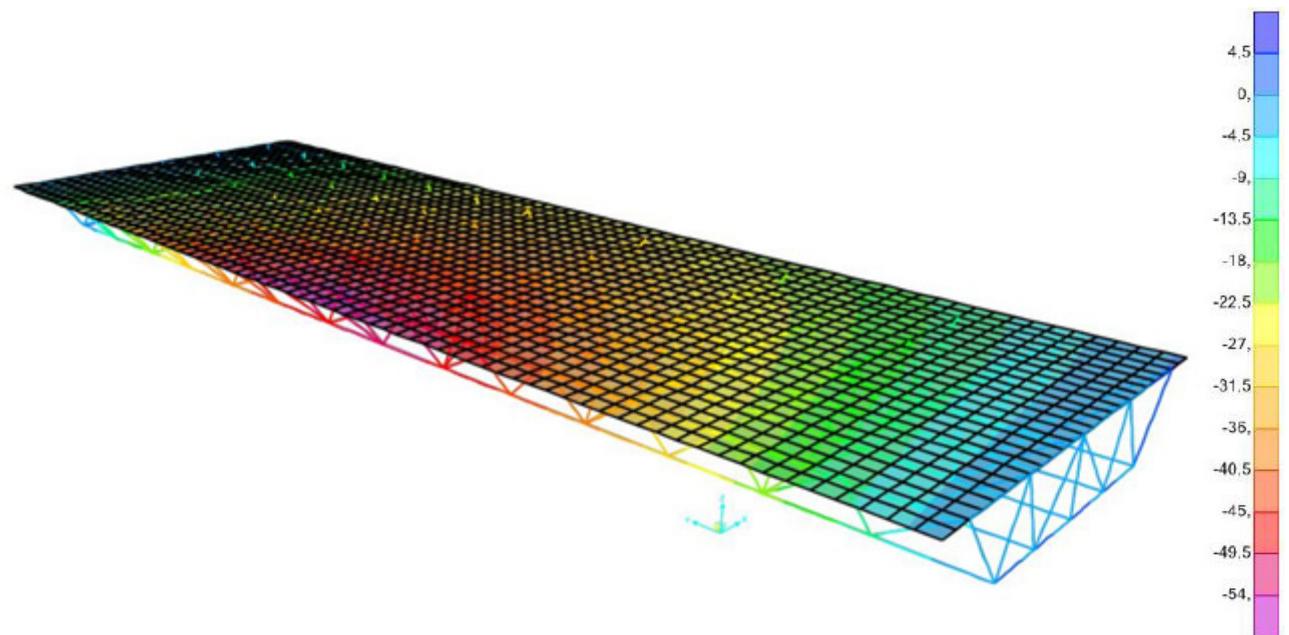


Figura 4.80 - Spostamenti verticali [mm] - Combinazione SLE
 $f_{max} = 57.4 \text{ mm}$; $f_{lim} = L/400 = 87.5 \text{ mm}$

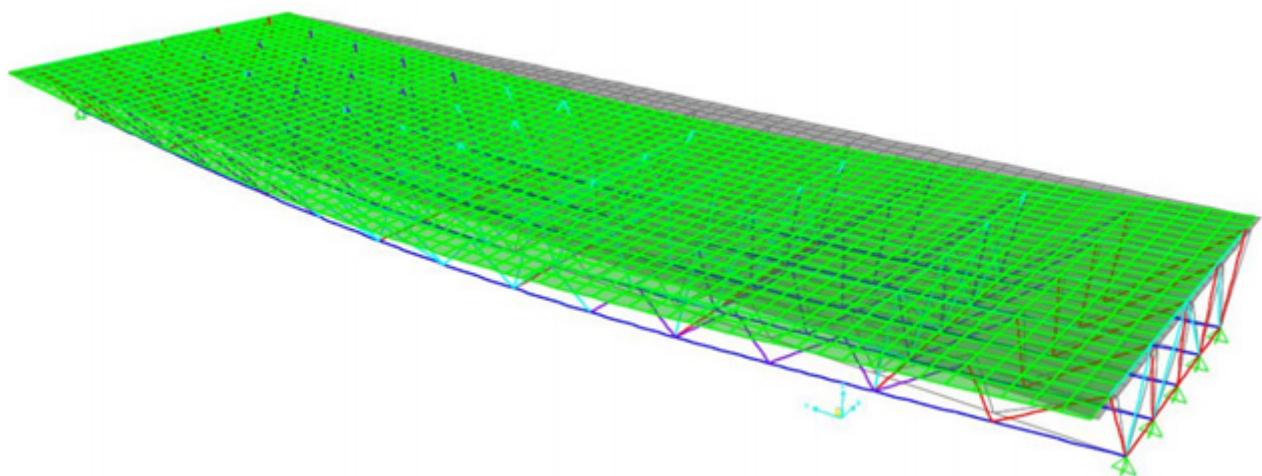


Figura 4.81 - Modo 1 - $T=0.56s$; $f=1.79Hz$;

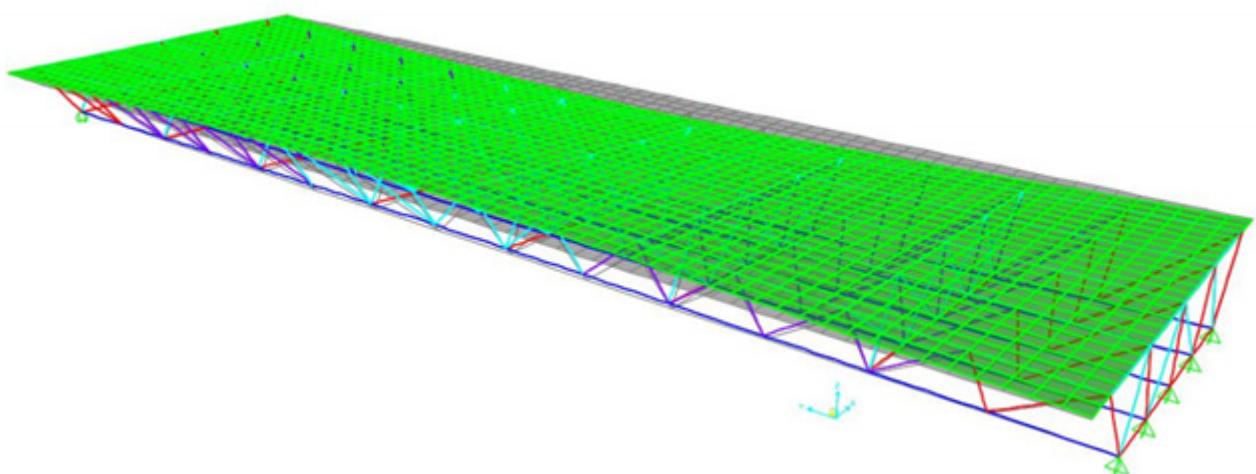


Figura 4.82 - Modo 2 - $T=0.39s$; $f=2.55Hz$;

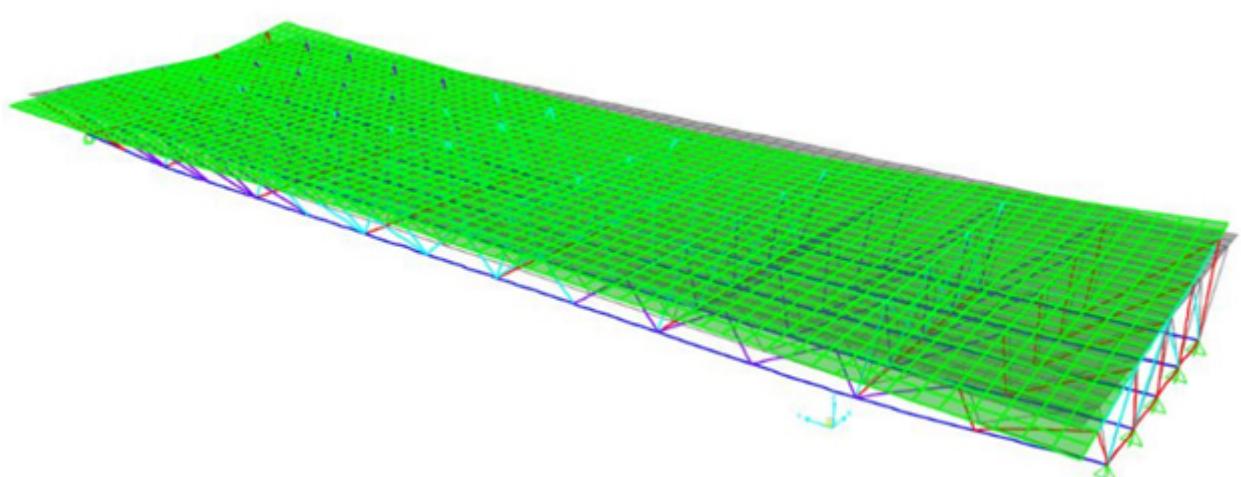


Figura 4.83 - Modo 3 - $T=0.20s$; $f=4.99Hz$;

4.5.3 Lunghezza di campata tipo: 25 m - 3 campate continue

75 m - Iperstatico - Soluzione a travata reticolare con profili tubolari a sezione circolare

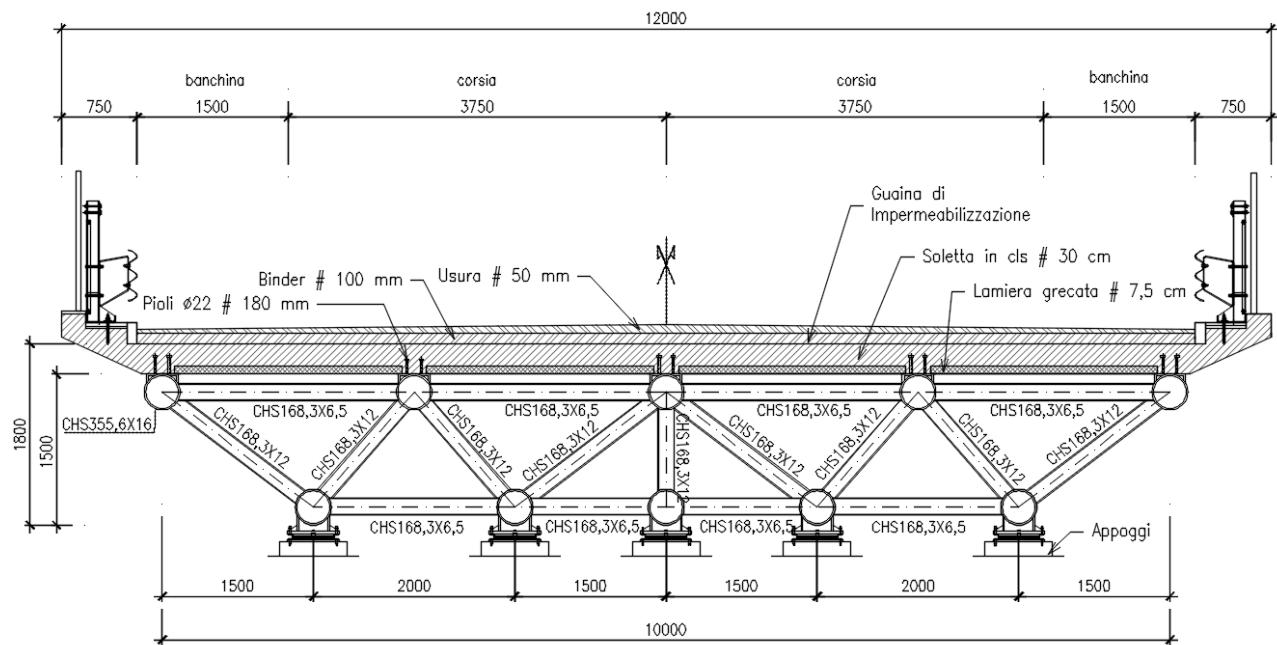


Figura 4.84 – Sezione tipo

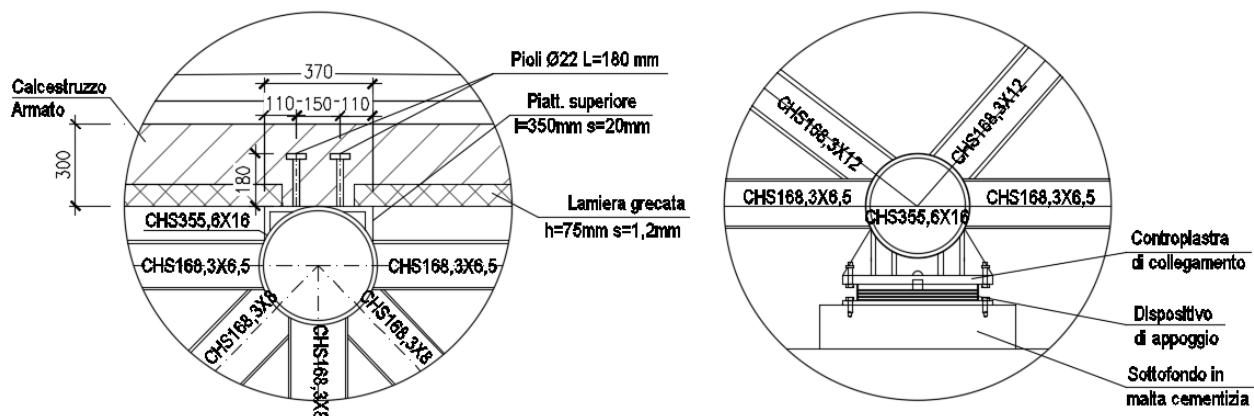


Figura 4.85 - Dettaglio soletta

dettaglio appoggio

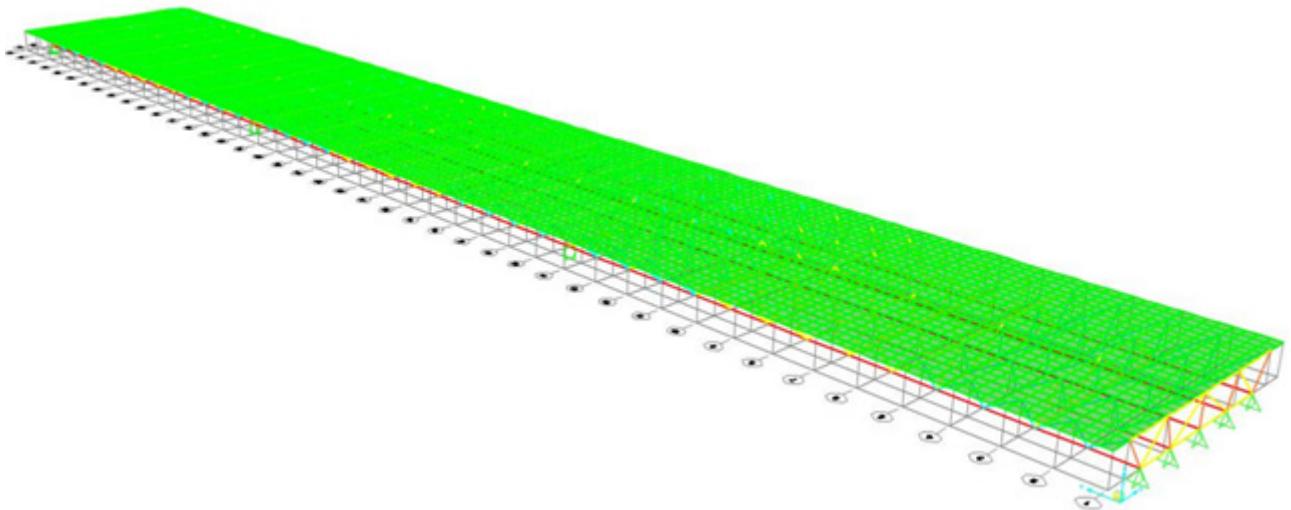


Figura 4.86 - Modello analitico

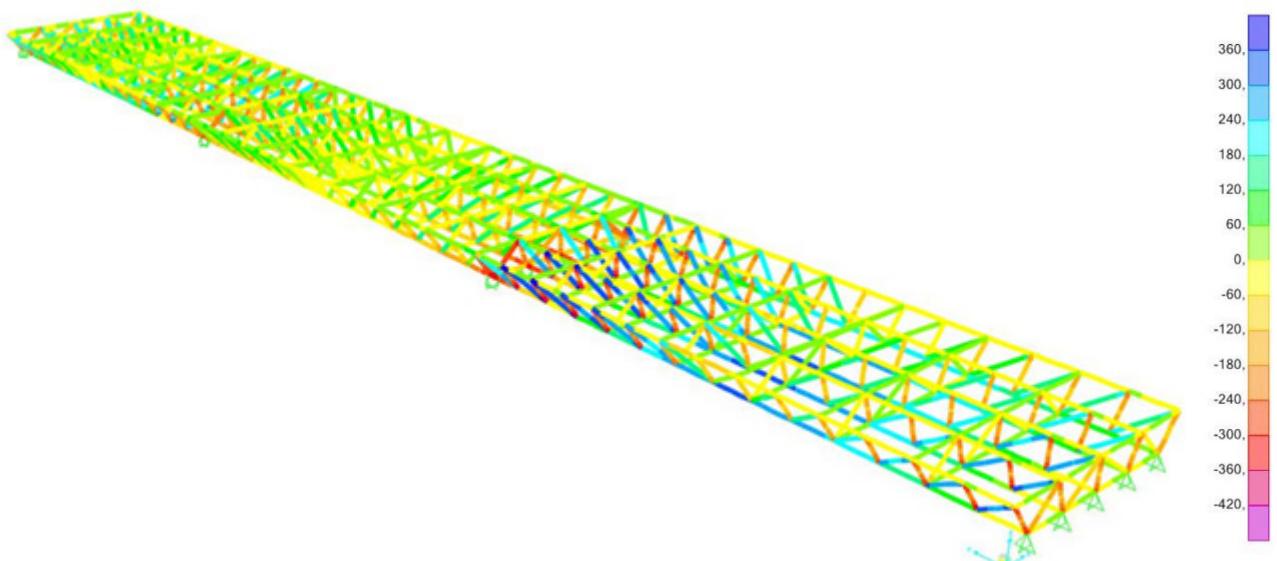


Figura 4.87 - Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in campata

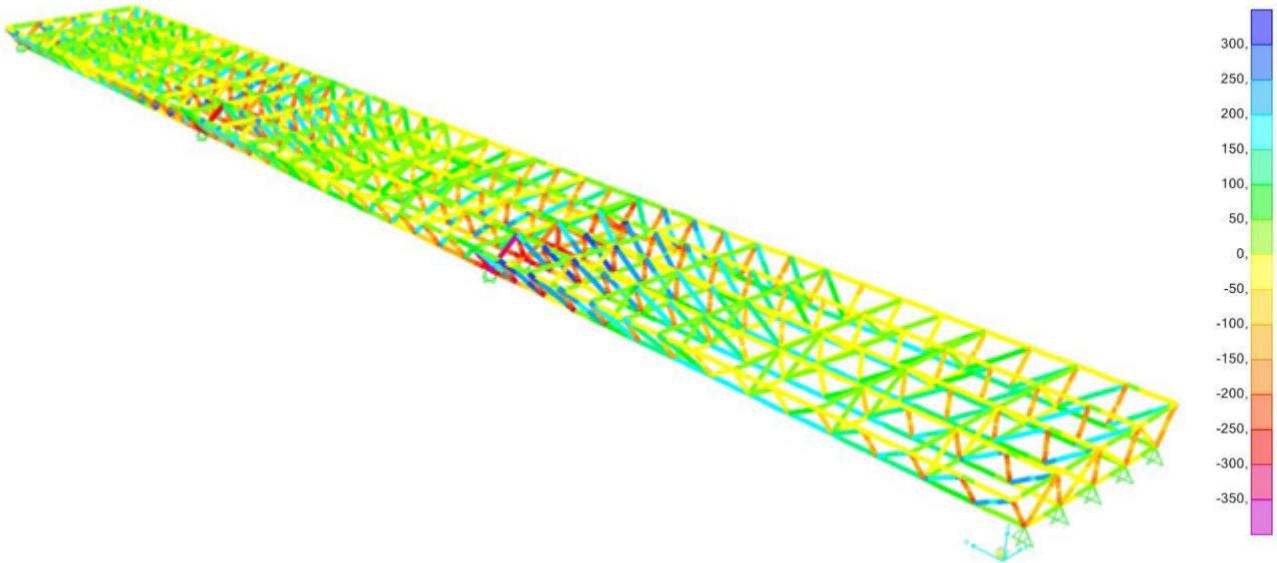


Figura 4.88 - Tensioni normali nelle aste [MPa] - Combinazione SLU massimizzante in appoggio

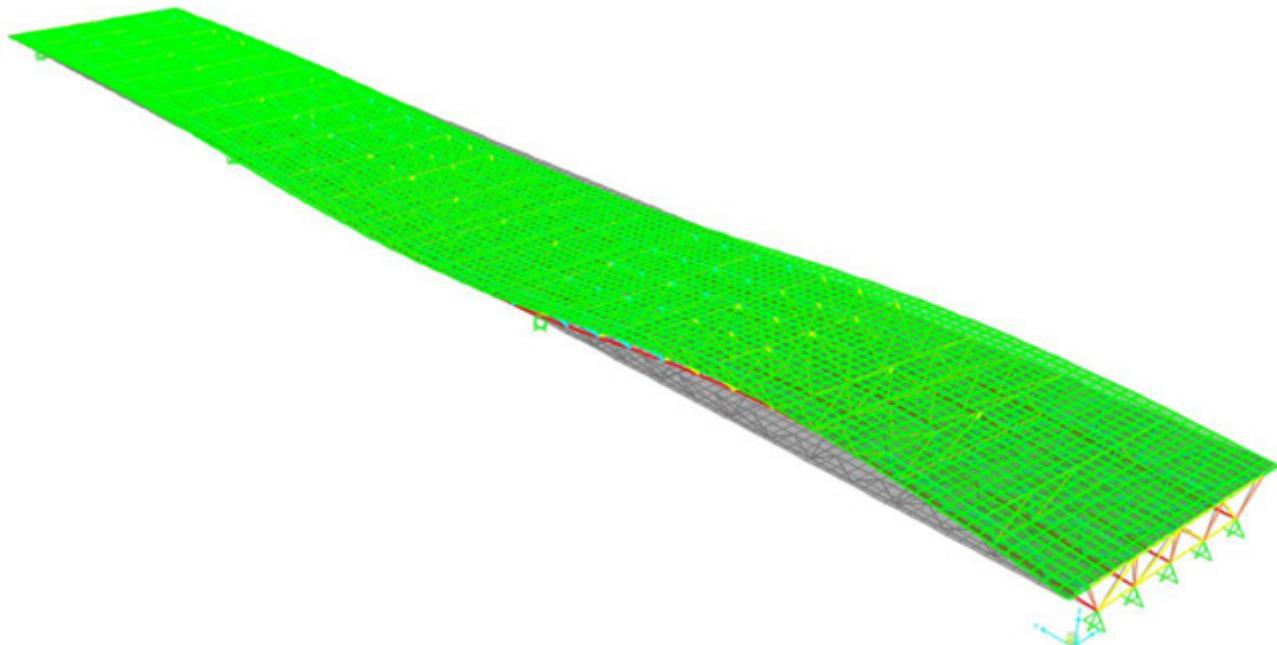


Figura 4.89 - Modo 1 - $T=0.46s$; $f=2.16\text{Hz}$;

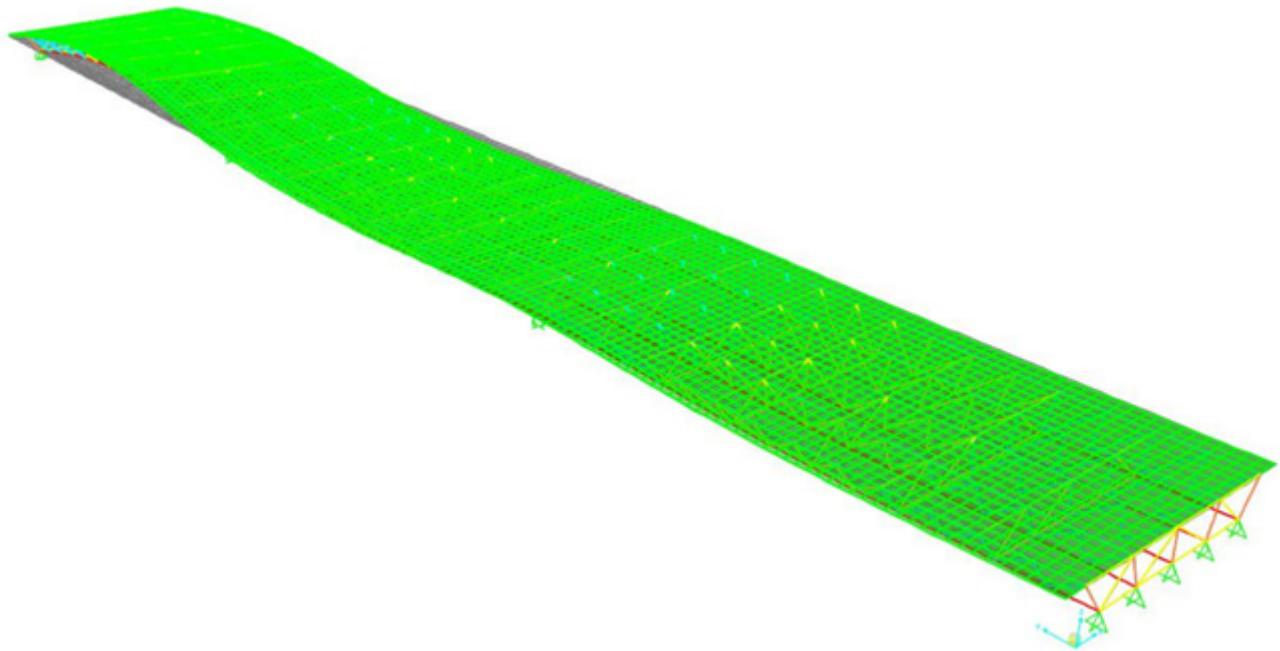


Figura 4.90 - Modo 2 - $T=0.38s$; $f=2.64Hz$;

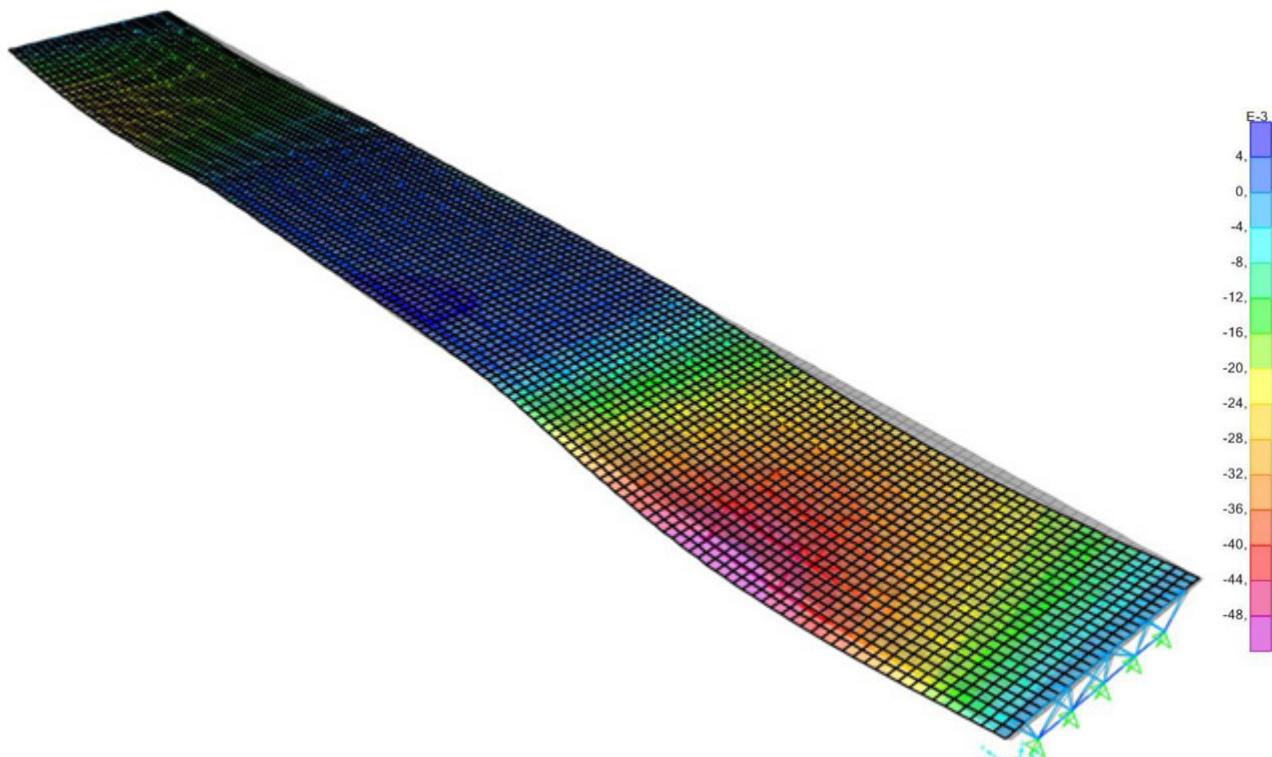


Figura 4.91 - Spostamenti verticali [mm] - Combinazione SLE
 $f_{max} = 51.4 \text{ mm}$; $f_{lim} = L/400 = 62.5 \text{ mm}$

I modelli ad elementi finiti per le soluzioni a travata reticolare con profili tubolari sono stati sviluppati attraverso il software SAP2000 v21.0®.

4.5.4 Esempi realizzativi



Figura 4.92 - Esempio di ponte a travata reticolare continua su più appoggi: Ponte sul fiume Po – SS9
(2009-2010 – Piacenza, luce tot: 810 m, campata max: 76 m)

Soluzione trave reticolare con profili tubolari imbullonati

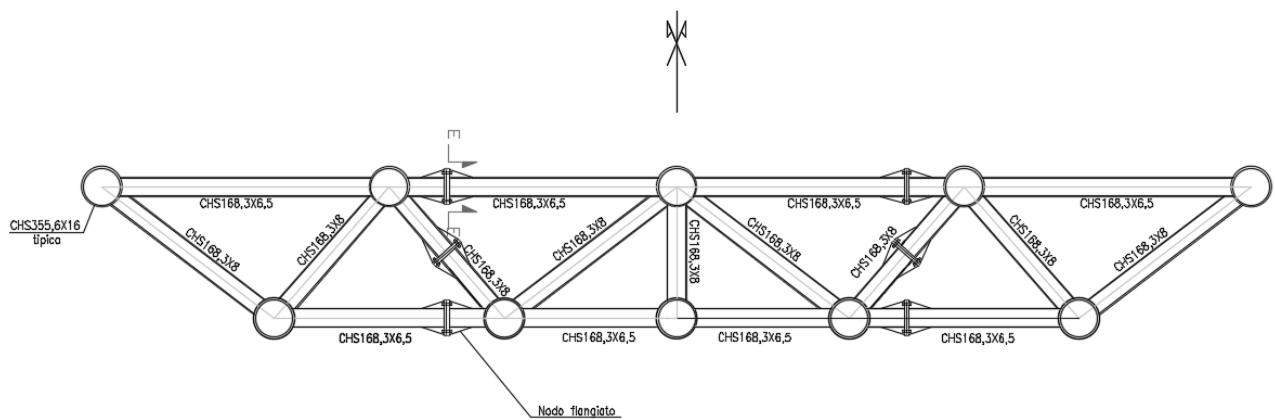


Figura 4.93 – Esempio suddivisione traverso bullonato

ESEMPIO NODO BULLONATO

Scala 1:20

SEZIONE E-E

Scala 1:20

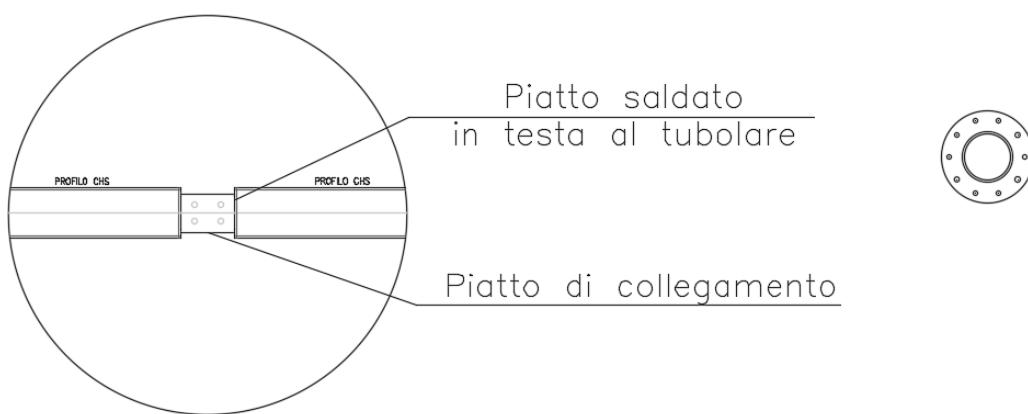


Figura 4.94 – Esempio nodo bullonato e sezione flangia

Confronto tra gli schemi in termini d'incidenza dell'acciaio

Di seguito si riportano, per gli schemi analizzati, le incidenze dell'acciaio utilizzato per le strutture reticolari.

Soluzioni progettuali unioni saldate		Peso totale	Superficie	Incidenza
		[kN]	[m ²]	[kg/m ²]
S460	Campata singola L=25m	307	300	102
	Campata singola L=35m	580	420	138
	Trave continua 3xL=75m	875	900	100
S355	Campata singola L=25m	424	300	141
	Campata singola L=35m	664	420	158
	Trave continua 3xL=75m	1157	900	130

Soluzioni progettuali unioni bullonate		Peso totale	Superficie	Incidenza
		[kN]	[m ²]	[kg/m ²]
S460	Campata singola L=25m	338	300	113
	Campata singola L=35m	638	420	152
	Trave continua 3xL=75m	963	900	107
S355	Campata singola L=25m	466	300	155
	Campata singola L=35m	730	420	174
	Trave continua 3xL=75m	1273	900	141

Dati di sintesi

- Impalcato: travata singola 25m x 12m
- Tipologia: travature reticolari mediante l'utilizzo di profili tubolari (UNI EN 10210 [5] - UNI EN 10219 [6])
- Soluzione con qualità acciaio S460NH: (rif. Disegno 7A)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 102 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 113 kg/m²
Acciaio S460NH $f_{yk} = 460 \text{ MPa}$;
- Soluzione con qualità acciaio S355NH: (rif. Disegno 7B)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 141 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 155 kg/m²
Acciaio S355NH $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa; fcd=17 MPa

- Impalcato: travata singola 35m x 12 m
- Tipologia: travature reticolari mediante l'utilizzo di profili tubolari (UNI EN 10210 [5] - UNI EN 10219 [6])
- Soluzione con qualità acciaio S460NH: (rif. Disegno 7C)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 138 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 152 kg/m²
Acciaio S460NH $f_{yk} = 460 \text{ MPa}$;
- Soluzione con qualità acciaio S355NH: (rif. Disegno 7D)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 158 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 174 kg/m²
Acciaio S355NH $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa; fcd=17 MPa

- Impalcato: trave continua, 3 campane di 25 m, totale 75 m x 12 m
- Tipologia: travature reticolari mediante l'utilizzo di profili tubolari continui ottenuti per estrusione (UNI EN 10210 [5])
- Soluzione con qualità acciaio S460NH: (rif. Disegno 7E)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 100 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 107 kg/m²
Acciaio S460NH $f_{yk} = 460 \text{ MPa}$;
- Soluzione con qualità acciaio S355NH: (rif. Disegno 7F)
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili saldati: 130 kg/m²
Peso della carpenteria Metallica sol. con profili imbullonati: 141 kg/m²
Acciaio S355NH $f_{yk} = 355 \text{ MPa}$;
- Calcestruzzo C30/37 - fck=30MPa;

Tabella confronto delle incidenze tra le diverse soluzioni studiate

Soluzione	Luce Impalcato (m)	Tipologia di acciaio	Peso kg/m ²
Multi-trave con profilo laminato Appoggio con traverso in calcestruzzo armato	25 - Isostatico	S460M S355J2W	120 150
	25 - Isostatico	S460M S355J2W	150 190
	35 - Isostatico	S460M S355J2W	240 290
	125 - Iperstatico	S460M S355J2W	120 150
		S460M S355J2W	140 170
	25 - Isostatico	S460M S355J2W	170
	25 - Isostatico	S460M S355J2W	170 210
	35 - Isostatico	S460M S355J2W	260 305
		S460M S355J2W	140 170
Con travi a cassone chiuso	35 - Isostatico	S355	160
	175 - Iperstatico	S355	150
Travi a doppio T profili saldati	25 - Isostatico	S355	210
	35 - Isostatico	S355	260
	125 - Iperstatico	S355	195
	25 - Isostatico	S460NH	105
A travata reticolare con tubolari Soluzione con unioni saldate	25 - Isostatico	S355NH	145
	35 - Isostatico	S460NH	140
	35 - Isostatico	S355NH	160
	75 - Iperstatico	S460NH	100
	75 - Iperstatico	S355NH	130
	25 - Isostatico	S460NH	115
	25 - Isostatico	S355NH	155
	35 - Isostatico	S460NH	155
A travata reticolare con tubolari Soluzione con unioni bullonate	35 - Isostatico	S355NH	175
	75 - Iperstatico	S460NH	110
	75 - Iperstatico	S355NH	145

Tabella 4.2 – Pesi carpenteria metallica di tutte le soluzioni studiate

NOTA: Le incidenze al m² sono arrotondate in multipli di 5.

4.6 Scelta della soluzione più conveniente per le solette negli impalcati a sezione mista acciaio-cls

4.6.1 Soluzioni alternative per le Solette

La soluzione scelta per gli impalcati è costituita da elementi a sezione mista acciaio–calcestruzzo, soletta piena con lamiera grecata o da lastre prefabbricate collaboranti, in tutti i casi l'altezza complessiva della soletta è di 300 mm.

Tali soluzioni sono state utilizzate sia nel caso di impalcato semplicemente appoggiato sia nel caso di impalcato continuo su cinque campate. Nel caso dell'uso di lastre prefabbricate collaboranti lo spessore considerato è di 70 millimetri con getto di completamento di 230 millimetri. Questa tipologia è particolarmente utilizzata per la soluzione in profili laminati a doppio T, mentre per tutti gli altri casi è sempre possibile utilizzare sia la soluzione con lastre prefabbricate sia la soluzione in lamiera grecata con getto di calcestruzzo.



Figura 4.95 – Esempio di ponte sospeso con nervature longitudinali per soletta con lamiera grecata

L'utilizzo di una soluzione mista acciaio-calcestruzzo consente di ottimizzare il funzionamento della sezione nel caso delle campate in semplice appoggio dove la soletta, oltre a fungere da piano di appoggio per le carreggiate, permette di assorbire la componente di compressione dello sforzo flettente, ottimizzando la sezione resistente e aumentando la rigidezza complessiva della struttura.

È possibile inoltre, la realizzazione della soletta mediante elementi interamente prefabbricati in stabilimento. Queste lastre prefabbricate con sezioni mediamente dai 2,5 a 4m di lunghezza, a tutto spessore, sono da posare sull'impalcato metallico e da collegare tra loro mediante esecuzione di giunti di connessione a completo ripristino. La prefabbricazione ha dei vantaggi costruttivi che la rendono molto competitiva sulle opere d'arte con una struttura e una geometria complessa come impalcati a graticcio o cassoni con elevati interasse, o di larghezza variabile e obliquità, riducendo il tempo di ultimazione e agevolando i lavori se le condizioni del sito sono sensibili come zone con forte ciclo gelo/disgelo, siti molto lontani dalle centrali di betonaggio e attraversamenti di viabilità esistenti. La prefabbricazione presenta il vantaggio di ridurre gli effetti del ritiro del calcestruzzo, per contro, richiede grande cura sia nella sua progettazione che nella sua costruzione.

Esistono due tipologie di lastre prefabbricate: a tutta larghezza (pari a quello della soletta) e a larghezza parziale. Per la prima tipologia si pone il problema della loro connessione alle travi principali: i connettori vengono concentrati in corrispondenza dei vuoti previste nelle lastre in fase di costruzione nello stabilimento e vengono chiamati "tasche di connessione". Queste tasche vengono poi riempite in opera con calcestruzzo ad alte prestazioni a ritiro compensato, avendo preventivamente cura di sigillare l'interstizio presente tra l'estradosso della trave metallica e l'intradosso delle lastre mediante iniezione di malta cementizia molto fluida.

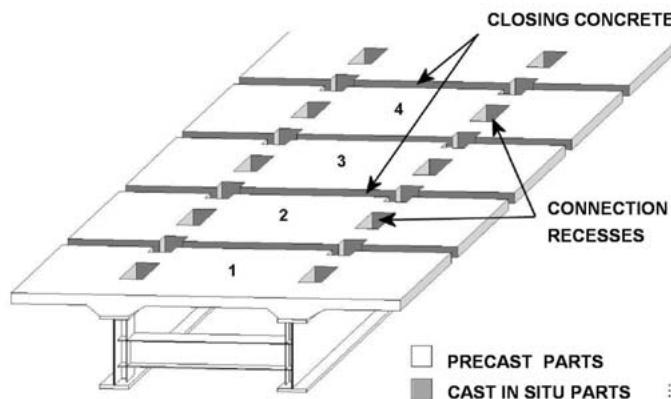


Figura 4.96 - Lastre prefabbricate a tutta larghezza

La lunghezza delle lastre è generalmente 2,50m. Questo valore corrisponde alla larghezza massima possibile per il trasporto in sagoma mediante camion. Ciò corrisponde anche ad un peso/lastra compreso tra 25÷30ton, considerato ancora compatibile con mezzi di sollevamento "standard".

Le lastre a larghezza parziale possono avere più soluzioni.

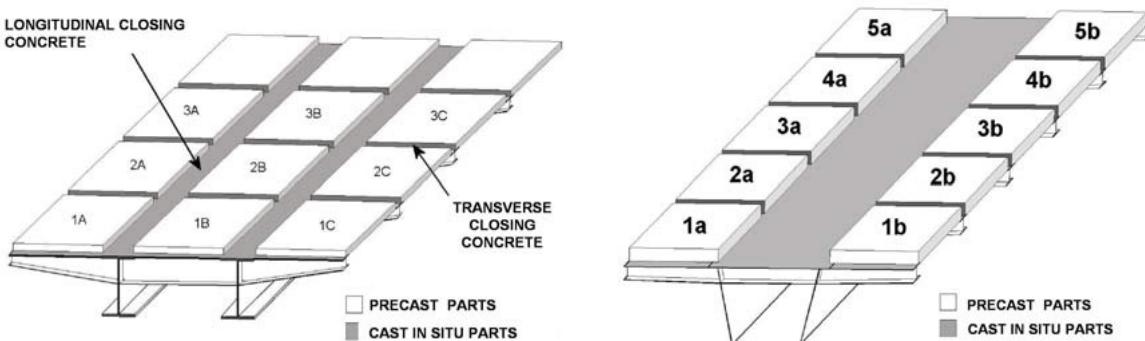


Figura 4.97 – Lastre prefabbricate a larghezza parziale

Lo spessore della lastra è mediamente di 25cm, quindi il peso di un elemento è generalmente compreso tra 10÷20ton.

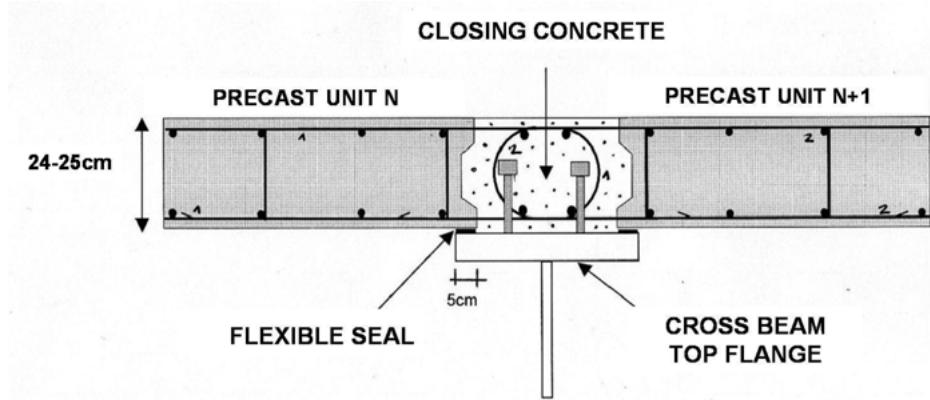


Figura 4.98 – Soluzione di getto con piattabanda della trave che funge da cassero

Nel caso in cui il volume di connessione si presenta “in aria”, senza un naturale supporto inferiore, il getto di connessione può essere realizzato in diversi modi, ma il più utilizzato e semplice è tramite cassaforma tradizionale.

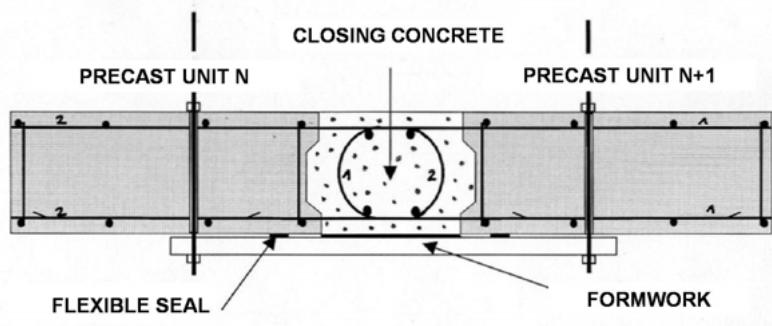


Figura 4.99 – Soluzione di getto con cassero tradizionale

In alternativa, esiste la possibilità di realizzare una struttura interamente metallica che sfrutta una lastra ortotropa. Questa soluzione può essere adoperata per tutte le soluzioni proposte e risulta indicata nel caso di strutture continue dove è possibile sfruttare la resistenza a trazione della lastra nelle zone a momento negativo.

In alternanza alle soluzioni già esposte, esiste la possibilità di utilizzare un’altra tecnologia, costituita da una piastra mista, cioè una piattabanda metallica continua, con tralicci e pioli di connessione saldati sull’estradosso, i quali dovranno garantire l’aderenza tra la piastra e la cappa di calcestruzzo superiore.

Tale soluzione garantisce una maggiore facilità realizzativa rispetto alle lastre ortotrope, consentendo comunque di eliminare la necessità di installare in opera delle ulteriori lastre che fungono da casseri per il getto di calcestruzzo della soletta. In questo caso la piastra metallica fungerà da armatura lenta inferiore per la soletta nelle due direzioni principali, garantendo un comportamento a piastra a tutta la struttura della soletta.

In questo documento, come riferito in precedenza, è stato scelto di utilizzare la soluzione con soletta in calcestruzzo armato, con lamiera grecata o lastre prefabbricate in c.a. collaboranti, la quale permette un consumo minore di acciaio e consente di adattarsi in maniera più flessibile ai progetti di sostituzione di impalcati di ponti esistenti in calcestruzzo.

Ciò nonostante, non si esclude che sia la soluzione con lastra ortotropa sia quella con piastra mista in acciaio e getto successivo o quello con soletta in c.a. prefabbricata possano rappresentare delle valide alternative alle sezioni miste in casi specifici dove la velocità di esecuzione assume fondamentale importanza.

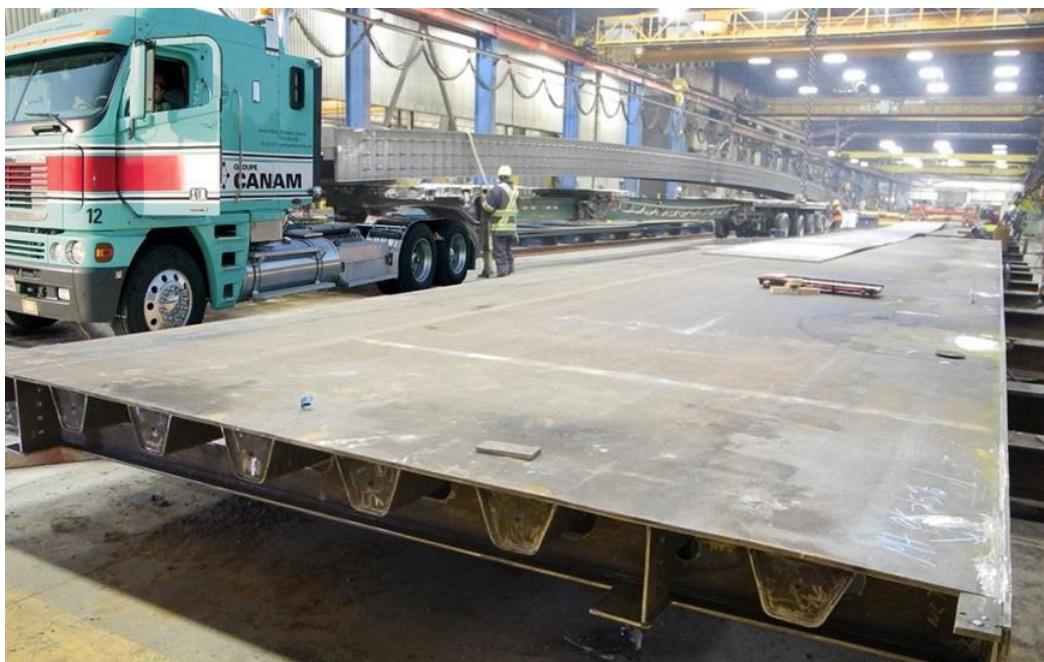


Figura 4.100 - Esempio di lastra a comportamento ortotropo

4.7 Lavorazioni preliminari sul cantiere per la sostituzione con una campata in acciaio, a seguito dello smantellamento di una campata di un ponte esistente in c.a.

Non verranno approfondite le modalità lavorative per gli interventi di demolizione e smantellamento; comunque, per consentire le operazioni di demolizione delle opere esistenti in c.a. e di varo delle nuove strutture in carpenteria metallica devono essere valutati diversi fattori.

È molto importante la valutazione dei vincoli esterni come il traffico e la sua deviazione, le distanze da altre opere o fabbricati e la conformazione altimetrica dell'area: ad esempio, l'utilizzo di macchinari per la rimozione della struttura originale in c.a. potrebbe creare problematiche a causa del loro ingombro, oppure potrebbe esserci la necessità di accedere ad aree private dovendo quindi richiedere preventivamente il permesso.

Di fondamentale importanza è considerare il periodo migliore nel quale eseguire i lavori, ad esempio se si interviene su un ponte è preferibile il periodo estivo durante il quale il bacino del fiume è ai minimi di portata d'acqua.



Figura 4.101 – Esempio di sostituzione di 3 campate da 20 m in c.a. con una sola da 60 m in acciaio



Figura 4.102 - Vista dell'intradosso del ponte preesistente e vista della nuova orditura metallica di un ponte sul Piave

Per la sicurezza in cantiere è fondamentale redigere il piano di sicurezza e coordinamento dell'intervento di sostituzione di un impalcato in c.a. con un impalcato in carpenteria metallica e va redatto in fase progettuale dal Coordinatore della sicurezza per la progettazione (CSP) ed aggiornato in fase di esecuzione dal Coordinatore della sicurezza per l'esecuzione (CSE). È di notevole importanza che il progettista e il CSP si interfaccino in fase di progettazione in modo tale da trovare le soluzioni migliori di intervento sia in termini di funzionalità dell'opera che in termini di sicurezza.

L'importanza di redigere un PSC è data dall'individuazione delle fasi lavorative ed i relativi rischi a cui sono soggetti gli operai in cantiere, specificando le interferenze tra le varie fasi valutando il programma dei lavori, steso in fase progettuale ed aggiornato in fase esecutiva.

4.8 Allargamenti di ponti in c.a.p. con strutture in acciaio

La necessità di allargare l'impalcato dei ponti esistenti rappresenta una situazione comune allo scopo di:

- Aumentare la capacità di un ramo autostradale;
- Consentire l'installazione di passerelle per il transito di pedoni e ciclisti ai lati delle carreggiate esistenti.

Tali interventi determinano la necessità di rinforzare la struttura esistente per sopportare i nuovi carichi e per permettere di installare i nuovi elementi strutturali. Per tali applicazioni l'acciaio rappresenta senza dubbio il materiale più indicato, garantendo i seguenti vantaggi:

- Introduzione di nuovi elementi strutturali di peso minore, molto importante per ridurre l'entità degli interventi di rinforzo delle strutture esistenti;
- Facilità di connessione alle strutture esistenti, permettendo di realizzare unioni bullonate tanto con strutture esistenti metalliche quanto con strutture in calcestruzzo armato (tramite tessellature);
- Rapidità di esecuzione, trattandosi di strutture leggere e parzialmente assemblate a pié d'opera è possibile ridurre l'impatto dell'intervento sulla viabilità;
- Rispetto alle soluzioni in calcestruzzo, gli interventi in acciaio non presentano sensibili effetti di ritiro e viscosità.
- Per quanto riguarda gli allargamenti di strutture esistenti in calcestruzzo con l'utilizzo di nuovi elementi metallici, si possono evidenziare due tipi di interventi ricorrenti:
 - a) Allargamento dell'impalcato senza utilizzo di nuovi elementi longitudinali:

Tali interventi consistono nell'allargamento della soletta esistente attraverso un rinforzo della porzione a sbalzo tramite delle mensole metalliche. Questo tipo di intervento è molto comune nei casi in cui l'allargamento sia di limitata entità o quando si debbano installare dei nuovi marciapiedi a lato delle carreggiate esistenti.



Figura 4.103 - Esempio di allargamento in acciaio con mensole trasversali

- b) Allargamento dell'impalcato introducendo nuovi elementi longitudinali:

Nel caso in cui i carichi sulle porzioni allargate siano maggiori, è necessario passare all'introduzione di nuovi elementi longitudinali. In tal caso una soluzione efficace è quella di utilizzare nuove travi metalliche, di rapida installazione, su nuovi appoggi adiacenti a quelli esistenti o, in alternativa, su di un allargamento dei pulvini presenti, dipendendo dalla geometria del ponte, dai carichi e dalle condizioni al contorno.



Figura 4.104 - Esempio di intervento di allargamento di un pulvino



Figura 4.105 - Esempio di allargamento di ponte esistente con travi metalliche poggiante su nuovi appoggi

Nel caso di utilizzo di nuove travi metalliche parallelamente a travi esistenti, è bene ricordare che dovrà essere valutata in maniera approfondita l'interazione tra le travi in utilizzo e le nuove.

Infatti, principalmente nel caso di allargamento con travi metalliche di un impalcato in c.a. esistente, è necessario considerare la differente rigidezza delle travi dell'impalcato allargato, la quale può generare il sovraccarico della struttura originaria

5. Giunti e Appoggi

Per quanto riguarda i giunti di dilatazione si rimanda al Quaderno Tecnico ANAS n. 8 "Interventi di ripristino delle condizioni di sicurezza dei giunti" e per gli interventi sugli appoggi si rimanda al Quaderno Tecnico ANAS n. 7 "Interventi locali sugli appoggi", tenendo presente che, per le nuove tipologie di appoggi, la frequenza di ispezione può essere eseguita ogni due anni a meno di situazioni di emergenza emerse internamente a questo periodo temporale.

Gli appoggi hanno normative armonizzate di riferimento ossia sono coperti da marchio CE in accordo con le relative parti della normativa europea EN 1337 [35].

5.1 Tipologie di sistema di vincolo

I dispositivi di appoggio sono necessari per realizzare il sistema di vincolo ottimale per l'impalcato, che possa trasferire alle sottostrutture, (spalle e pile), le azioni di progetto (carichi verticali e orizzontali) e al contempo permetta la dilatazione termica delle travi ed eventuali spostamenti rigidi di natura sismica in direzione longitudinale e trasversale.

Tutti gli appoggi devono inoltre consentire le rotazioni di progetto delle travi.

Le possibili tipologie di sistema di vincolo che il progettista dell'opera può prevedere sono sostanzialmente due: il vincolo orizzontalmente rigido (rigidezza orizzontale infinita) ed il vincolo orizzontalmente cedevole (rigidezza orizzontale non infinita).

Il primo sistema di vincolo consiste nel garantire l'ancoraggio rigido delle travi alle sottostrutture, in modo che le forze orizzontali possano essere trasmesse dall'impalcato al baggiolo senza generare spostamenti.

Al contempo il sistema deve comunque garantire la possibilità delle travi di sviluppare le deformazioni irreversibili (fluege, ritiro) e reversibili (dilatazioni termiche) in ogni direzione orizzontale: per tale motivo questo sistema di vincolo necessita di un'opportuna disposizione di appoggi fissi, unidirezionali e multidirezionali.

- Gli appoggi fissi possono resistere e trasmettere alla struttura sottostante il carico verticale e il carico orizzontale in qualsiasi direzione nel piano. Gli unici gradi di libertà permessi sono la rotazione attorno all'asse verticale e quelle attorno agli assi orizzontali: sono quindi modellabili come cerniere.

La progettazione dei ponti è vincolata dalla presenza di elementi naturali ed artificiali che condizionano unici gradi di libertà permessi sono la rotazione attorno all'asse verticale e quelle attorno agli assi orizzontali: sono quindi modellabili come cerniere.

- Gli appoggi unidirezionali trasmettono alla struttura inferiore il carico verticale e il carico orizzontale lungo una sola direzione, mentre consentono il movimento lungo la direzione ortogonale e tutte le rotazioni: sono quindi modellabili come carrelli monodirezionali.

- Gli appoggi multidirezionali trasmettono esclusivamente il carico verticale, mentre permettono lo scorrimento in qualsiasi direzione orizzontale: sono quindi modellabili come carrelli mobili lungo qualsiasi direzione orizzontale.

La seconda tipologia di vincolo consiste nel garantire un ancoraggio delle travi alle sottostrutture che non sia infinitamente rigido ma che abbia una determinata rigidezza orizzontale finita (generalmente nell'ordine di 0.5-5 kN/mm per ogni appoggio): in questo modo le forze orizzontali sono trasmesse da impalcato a baggiolo generando uno spostamento rigido dell'impalcato stesso, funzione della rigidezza orizzontale degli appoggi.

Allo stesso modo ogni movimento o deformazione imposta all'appoggio provoca un carico orizzontale di risposta elastica. In conclusione, il progettista può prevedere tale tipologia di vincolo solo se accetta che i carichi laterali imposti all'impalcato (azione del vento, sisma, frenatura) possano causare uno spostamento rigido dello stesso.

Per realizzare questo sistema di vincolo sono necessari appoggi cedevoli lateralmente (appoggi elastomerici o appoggi multidirezionali accoppiati a ritegni cedevoli, entrambi modellabili come carrelli accoppiati a molle orizzontali), per i quali non vi è dunque distinzione tra appoggi fissi e scorrevoli: questo porta alla definizione del primo vantaggio di questo sistema, ossia la possibilità di utilizzare, per una determinata opera, lo stesso modello di appoggio sotto ogni trave senza doverne differenziare la disposizione, con evidenti benefici economici e di gestione.

Il secondo vantaggio riguarda la risposta sismica dell'impalcato: realizzare un piano di appoggio con rigidezza non infinita significa garantire un periodo proprio della struttura di valore medio-alto (inversamente proporzionale alla rigidezza) e quindi un valore di accelerazione orizzontale (ordinata dello spettro di risposta) relativamente basso: è questo infatti il principio sul quale si basa l'isolamento sismico delle strutture.

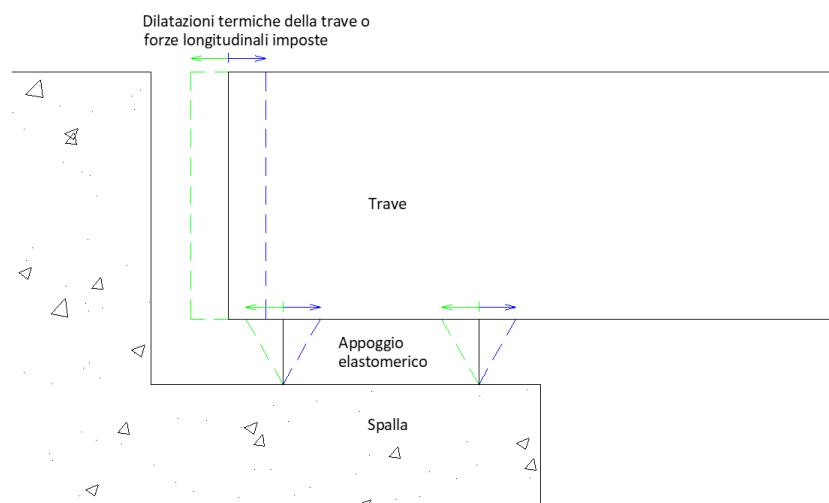


Figura 5.1 – Comportamento schematico di una trave da ponte su di un vincolo cedevole (appoggio elastomerico) soggetto a dilatazioni o carichi orizzontali

5.2 Tipologie di appoggi per sistema di vincolo rigido

Per quanto riguarda il primo sistema di vincolo (vincolo rigido), tra le più comuni tipologie di appoggi strutturali che possono essere utilizzate per realizzarlo troviamo gli appoggi a disco elastomerico confinato (o "appoggi pot"), per i quali la normativa di riferimento è la UNI EN 1337-5 [36] "Appoggi strutturali - Parte 5: Appoggi a disco elastomerico confinato" (la norma specifica i requisiti per la progettazione e la fabbricazione di appoggi a disco elastomerico confinato destinati ad essere impiegati con temperature di esercizio comprese tra - 40° e 50 °C).

Questi appoggi sono composti da un disco elastomerico incapsulato in una piastra metallica di base (baseamento). Una piastra superiore (pistone) funge da coperchio andando a coprire il disco di gomma trasferendo il carico verticale. La rotazione è permessa per mezzo della deformazione per schiacciamento del disco di gomma.

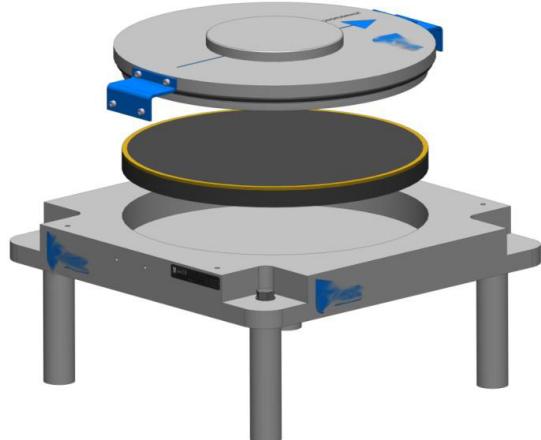


Figura 5.2 – Appoggio a disco elastomerico confinato

Come già citati in precedenza gli appoggi fissi possono essere unidirezionali o multidirezionali: per gli appoggi scorrevoli il movimento è permesso attraverso lo scorrimento della piastra superiore (con superficie in acciaio inox lucidato a specchio) su di una superficie di PTFE lubrificato incassata nel pistone.

La progettazione e la produzione delle superfici di scorrimento (acciaio inox – PTFE) è normata dalla EN 1337-2 [35] "Appoggi strutturali - Parte 2: Superfici di scorrimento".

Se l'appoggio deve garantire il movimento lungo una sola direzione (appoggi unidirezionali), esso può essere "guidato" per mezzo di una barra di guida ancorata al pistone e incassata nella piastra superiore di scorrimento.

Un'altra tipologia di appoggi che può essere utilizzata per realizzare un sistema di vincolo rigido riguarda gli appoggi a calotta sferica. La normativa di riferimento per questi appoggi è la UNI EN 1337-7 [36] "Appoggi strutturali - Parte 7: Appoggi a calotta sferica".

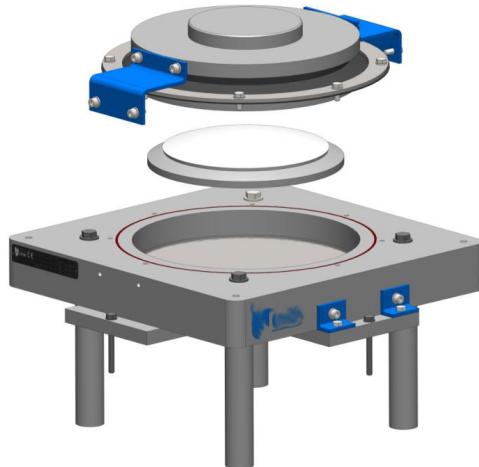


Figura 5.3 – Appoggio a calotta sferica

Il funzionamento di questa tipologia di appoggi si basa sulla rotazione per scorrimento tra una superficie curva di PTFE nicchiata e lubrificata (incassata all'intadossso di una piastra di supporto) e l'estradossso di una calotta sferica realizzata in modo da minimizzare l'attrito di contatto (alluminio, acciaio con ricoprimento di lamina in acciaio inox o acciaio cromato).

Questo meccanismo di rotazione garantisce agli appoggi a calotta sferica una capacità di rotazione di gran lunga superiore rispetto a quella degli appoggi convenzionali (elastomerici o a disco elastomerico confinato). Anche per quanto riguarda la massima capacità di carico verticale, questi appoggi garantiscono prestazioni superiori. Le migliori prestazioni rendono questa tipologia di appoggio particolarmente indicata per impalcati ferroviari. Anche questa tipologia di appoggio prevede la distinzione in appoggi fissi, unidirezionali e multidirezionali. La progettazione e la produzione delle superfici di scorrimento (acciaio inox – PTFE) e di rotazione è normata dalla EN 1337-2 [35] "Appoggi strutturali - Parte 2: Superficie di scorrimento".

5.3 Tipologie di appoggi per sistema di vincolo cedevole

Per quanto riguarda il secondo sistema di vincolo mostrato (vincolo cedevole orizzontalmente), la più comune tipologia di appoggi strutturali utilizzati per realizzarlo riguarda gli appoggi elastomerici (appoggi in gomma armata), per i quali la normativa di riferimento è la UNI EN 1337-3 [36] "Appoggi strutturali - Parte 3: Appoggi elastomerici". La norma stabilisce le caratteristiche degli appoggi elastomerici, provvisti o meno di dispositivi di supporto complementari, impiegati nelle strutture di ponti o in altre strutture aventi condizioni di supporto comparabili. Gli appoggi elastomerici sono costituiti da una serie di strati di gomma vulcanizzati a piastrine di acciaio che hanno la funzione di aumentare la resistenza dell'appoggio all'instabilità a fronte di carichi verticali elevati. La capacità di movimento orizzontale è garantita dalla deformazione a taglio degli strati di gomma: per tale ragione ogni movimento imposto all'appoggio provoca un carico orizzontale di risposta elastica, conseguenza della rigidezza orizzontale del dispositivo. Allo stesso modo, ogni carico orizzontale imposto all'appoggio (vento, forze sismiche, frenatura, ecc) genera una deformazione orizzontale degli strati di gomma e quindi uno spostamento dell'impalcato. La rigidezza orizzontale è direttamente proporzionale all'area in pianta dell'appoggio e inversamente proporzionale all'altezza totale di gomma (somma degli spessori degli strati in gomma).

La rotazione è permessa per la deformazione a schiacciamento dell'appoggio. La tipologia più semplice di appoggi in gomma armata consiste in un panetto di gomma rinforzato da lamierini vulcanizzati interni, senza piastre esterne di ancoraggio (in questo caso per la trasmissione dei carichi orizzontali alle strutture adiacenti avviene per attrito, che deve quindi essere verificato). In alternativa, è possibile dotare l'appoggio di piastre esterne vulcanizzate alla gomma che hanno la funzione di accogliere gli ancoraggi meccanici (viti, zanche, perni). La normativa prescrive che non si possa fare affidamento all'attrito per la trasmissione dei carichi orizzontali nel caso di strutture sottoposte a sollecitazioni dinamiche con possibili fluttuazioni estreme dei carichi (per esempio impalcati ferroviari o strutture soggette a carichi sismici): in questi casi bisogna dunque prevedere l'utilizzo di appoggi dotati di ancoraggi meccanici.

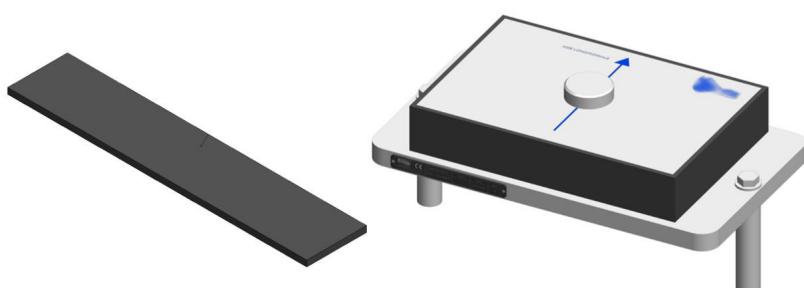


Figura 5.4 – Appoggi elastomerici senza e con ancoraggi meccanici

5.4 Isolatori sismici

Gli isolatori sismici sono dispositivi di vincolo cedevoli orizzontalmente che, oltre ad assolvere le funzioni classiche degli appoggi da ponte (resistere ai carichi verticali e orizzontali, consentire spostamenti e rotazioni) sono dotati di una limitata rigidezza orizzontale che consente di poter aumentare il periodo proprio della struttura e, di conseguenza, abbatterne la forzante sismica. In questo modo è possibile, durante l'evento sismico, fare in modo che l'opera risulti svincolata rispetto alle strutture di base (spalle e pile) che si muovono solidalmente al terreno, diminuendo così la forza orizzontale di inerzia trasmessa.

Gli isolatori sismici garantiscono inoltre un determinato livello di dissipazione dell'energia trasmessa dal terremoto: in questo modo è possibile aumentare lo smorzamento equivalente della struttura abbattendone lo spettro di risposta.

I dispositivi devono infine avere capacità di ricentraggio: essi infatti devono garantire il vincolo continuo tra impalcato e sottostruttura (nonostante lo spostamento relativo) e assicurare che, una volta terminato l'evento sismico, possa essere riconfigurata la disposizione iniziale degli elementi permettendo il proseguo dell'utilizzo della struttura (in base al livello del sisma occorso).

La tipologia più nota di isolatore sismico è l'isolatore sismico elastomerico (isolatore HDRB, *High Damping Rubber Bearing*), che si presenta simile ad un normale appoggio elastomerico (realizzato con sequenza di strati in gomma e lamierini di rinforzo) con piastre metalliche esterne vulcanizzate che ospitano i mezzi di ancoraggio alle strutture (viti, zanche, perni).

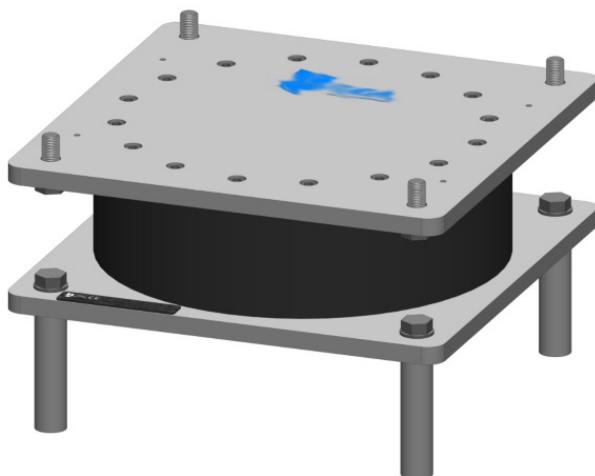


Figura 5.5 – Isolatore sismico elastomerico HDRB

La capacità di movimento orizzontale è garantita dalla deformazione a taglio degli strati di gomma: per tale ragione, esattamente come per gli appoggi elastomerici, ogni movimento imposto all'isolatore provoca un carico orizzontale di risposta elastica, conseguenza della rigidezza orizzontale del dispositivo.

Allo stesso modo, ogni carico orizzontale imposto all'appoggio genera una deformazione orizzontale degli strati di gomma e quindi uno spostamento della struttura.

La gomma utilizzata è realizzata con mescole dotate di proprietà dissipative che forniscono al dispositivo la capacità di smorzamento dell'energia sismica durante i cicli di deformazione a taglio (le mescole utilizzate forniscono un coefficiente di smorzamento equivalente minimo pari al 12%).

La rigidezza orizzontale è direttamente proporzionale all'area in pianta dell'appoggio, alla durezza della mescola utilizzata e inversamente proporzionale all'altezza totale di gomma (somma degli spessori degli strati in gomma).

Sono inoltre disponibili isolatori elastomerici con capacità dissipativa aumentata (isolatori LRB, *Lead-Rubber Bearing*): isolatori in gomma-acciaio dotati di uno o più nuclei in piombo puro inseriti all'interno del dispositivo con la funzione di aumentare sensibilmente la capacità dissipativa del dispositivo (che può raggiungere in questo modo il 40%) e fornire una notevole rigidezza iniziale che può essere utile per limitare gli spostamenti della struttura sotto forze di esercizio.

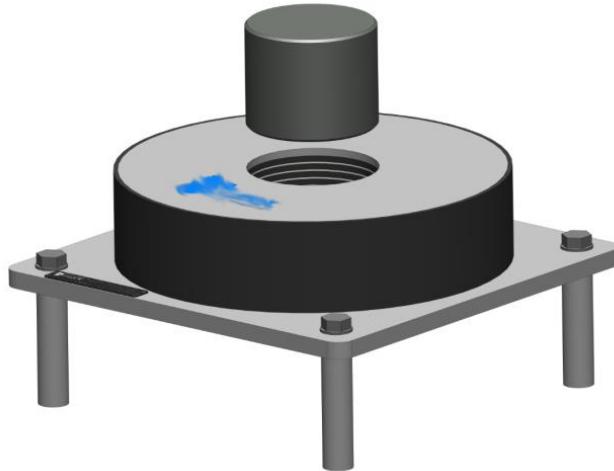


Figura 5.6 – Isolatore sismico elastomerico con nucleo in piombo LRB

La normativa che regola la progettazione e la produzione dei dispositivi antisismici è la EN 15129 [39], che prescrive inoltre le prove di qualifica e di collaudo per le varie tipologie di prodotto.

5.5 Dissipatori sismici

Per aumentare la capacità dissipativa di un'opera, sia essa di nuova costruzione oppure esistente (in questo caso si parla di *retrofitting sismico*), è possibile installare dispositivi agenti in regime dinamico e atti alla dissipazione dell'energia sismica: si tratta dei dissipatori sismici, la cui progettazione e produzione è normata dalla EN 15129 [39], che ne prescrive le prove di qualifica e di collaudo.

Le tipologie maggiormente utilizzate sono due: i dissipatori sismici isteretici e i dissipatori sismici fluidodinamici.

I dissipatori sismici isteretici sfruttano la capacità dissipativa di elementi in acciaio ad alta duttilità opportunamente sagomati: questi elementi dissipativi possono essere accoppiati ad un appoggio mobile o essere disposti in un sistema di ritenuta (ritegni smorzanti per ponti o controventi dissipativi), per fornire smorzamento lungo una o più direzioni di movimento. Gli elementi smorzanti sono sagomati a "falce" e agiscono in apertura-chiusura garantendo in questo modo la completa plasticizzazione della sezione per il momento flettente applicato; il conseguente comportamento dinamico elasto-plastico permette di esibire il massimo spostamento sismico e fornire la dissipazione dell'energia sismica richiesta. Le grandezze che governano il comportamento dinamico (valori di spostamento, carico, rigidezza, smorzamento) dipendono dalle dimensioni dell'elemento (spessore, angolo di apertura, variazione del raggio di curvatura, variazione di larghezza del profilo) che vengono dunque scelte appositamente per soddisfare i requisiti di progettazione.

Ogni estremità del dispositivo è ancorata alla struttura esterna per mezzo di un perno inserito in un anello di ancoraggio dotato di cerniera sferica.

L'elevata rigidezza iniziale dell'elemento (a bassi spostamenti) è utile per garantire un comportamento rigido in servizio. L'intero comportamento ciclico è indipendente dalla velocità di carico e può fornire una capacità di smorzamento superiore al 40%.



Figura 5.7 – Dissipatore sismico isteretico

I dissipatori sismici fluidodinamici sono cilindri oleodinamici a movimento assiale con fluido siliconico viscoso che, grazie ad un sistema di valvole interne, riescono a garantire un comportamento dinamico governato da una legge secondo la quale la risposta (carico assiale) e la conseguente capacità dissipativa sono fortemente dipendenti dalla velocità di applicazione del carico.

Questa tipologia di dissipatori viene utilizzata quando è richiesta una dissipazione di energia sismica molto elevata (fino al 60%) e quando è utile limitare al massimo la reazione a fronte di spostamenti lenti (essendo il sistema viscoso, la reazione data dagli spostamenti lenti di servizio è trascurabile).



Figura 5.8 - Dissipatore sismico fluidodinamico

Anche questa tipologia di dissipatori presenta due estremità dotate di anello di ancoraggio con cerniera sferica, una da ancorare alla struttura per la quale è richiesta la dissipazione e l'altra da ancorare alla struttura esterna solidale al terreno.

5.6 Ritegni sismici

Utili ai fini della protezione sismica delle strutture, sia esistenti sia di nuova realizzazione, sono i ritegni sismici.

I ritegni sismici sono dispositivi di collegamento rigido progettati per resistere e trasmettere il carico orizzontale generato dall'azione sismica di progetto e possono essere sostanzialmente di due tipi: ritegni permanenti o ritegni dinamici.

I ritegni permanenti sono tutti quei dispositivi di vincolo (ancoraggi meccanici, chiavi di taglio, controventi, ritegni di fine-corsa, dispositivi di accoppiamento trave-pilastro, ecc...) che sono sempre attivi sia in fase dinamica (condizione sismica) sia in fase statica (condizione di servizio) e il loro comportamento non dipende dalla velocità di applicazione del carico.

I ritegni dinamici sono invece dispositivi a comportamento viscoso che garantiscono resistenza solo a fronte di azioni impulsive (condizione sismica), mentre consentono gli spostamenti lenti (condizione di servizio) opponendo reazioni limitate o completamente trascurabili.

I più utilizzati ritegni dinamici sono i dispositivi shock transmitters: cilindri oleodinamici a doppio effetto che, sfruttando la sola capacità viscosa dell'olio, garantiscono un ritegno rigido tra le due strutture connesse agente solo in presenza di azioni impulsive (dinamiche).

Tali dispositivi sono da utilizzare quando si ha la necessità di creare un collegamento rigido non dissipativo tra due strutture diverse o due elementi strutturali della stessa costruzione (trave-pilastro, pila-impalcato, ecc...) che venga attivato solamente in fase dinamica (a fronte della forzante sismica o del carico da vento) e che renda comunque possibili gli spostamenti lenti di servizio (spostamenti irreversibili e deformazioni termiche).

Tutte le componenti del dispositivo (cilindro, stelo, perni di estremità, ancoraggi alle strutture esterne) sono quindi dimensionate in base alla forza massima assiale alla quale il dispositivo deve resistere e allo spostamento massimo che deve garantire a fronte delle azioni lente.

Ogni estremità del dispositivo è ancorata alla struttura esterna per mezzo di un perno inserito in un anello di ancoraggio provvisto di cerniera sferica, che garantisce al dispositivo la capacità di rotazione attorno ad ogni asse.

Il comportamento tipico forza-spostamento è molto semplice, dato che il dispositivo è progettato in modo da essere un ritegno rigido (per alte velocità di carico) e non fornire dissipazione.

Anche in questo la normativa di riferimento è la EN 15129 [39].

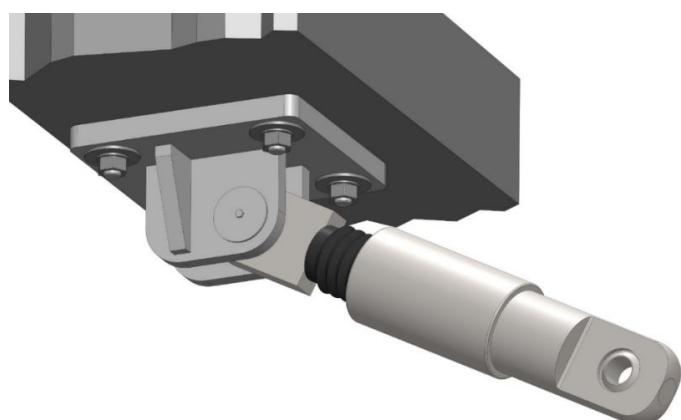


Figura 5.9 – Ritegno sismico dinamico shock-transmitters

6. I prodotti e la durabilità (Materiali e Trattamenti protettivi per i ponti in acciaio)

6.1 Materiali

Il tecnico che si occupa della sostituzione di ponti esistenti con nuovi manufatti in carpenteria metallica ha la possibilità di utilizzare una vasta gamma di prodotti che si possono distinguere nella pratica in due tipi di approcci, basati rispettivamente sulla composizione chimica e sul processo produttivo.

La norma UNI EN 10020-1 [1] definisce il termine “acciaio” e stabilisce la classificazione in acciai non legati, acciai inossidabili ed altri acciai legati in base alla composizione chimica mentre la UNI EN 10027-1/2 [2] [3] specifica le regole per la designazione alfanumerica degli acciai con riferimento all’impiego e alle principali caratteristiche, per esempio meccaniche, fisiche, chimiche, per fornire un’identificazione degli acciai abbreviata.

Si definiscono acciai non legati quegli acciai per i quali tutti i tenori degli elementi di lega risultano inferiori ai rispettivi limiti indicati in tabella nella norma UNI EN 10020 [1]; gli acciai legati invece, sono quegli acciai che non sono inossidabili e che hanno almeno un elemento di lega con tenore in percentuale di massa superiore rispetto ai limiti imposti.

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	Al	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Altri(*)
0.3	0.0008	0.1	0.3	0.3	0.4	0.1	1.65	0.08	0.06	0.3	0.4	0.1	0.6	0.1	0.05	0.1	0.3	0.05	0.1

Tabella 6.1 - Tenori limite dei componenti per la classificazione di acciai legati e non legati (*)

(*) Ad eccezione degli elementi carbonio, fosforo, zolfo e azoto.

Gli acciai inossidabili sono individuati prevalentemente in base al contenuto percentuale in massa di Cromo che deve essere maggiore di 10.5% e di Carbonio che deve essere minore di 1.2%.

La classificazione più significativa per il mondo delle costruzioni è in base al processo produttivo dove si individuano tre categorie di prodotti, gli acciai laminati a caldo piani e lunghi normati dalla UNI EN 10025 [4], gli acciai per profilati cavi finiti a caldo normati dalla UNI EN 10210 [5] ed infine gli acciai laminati a caldo e formati a freddo normati dalla UNI EN 10219 [6].

La classe di acciaio riferita alla UNI EN 10025 [4] è possibile trovarla in cinque diverse condizioni di fornitura in base al procedimento produttivo utilizzato e sono acciaio semplicemente laminato “As rolled” (AR), acciaio normalizzato (N), acciaio termomeccanico (M), acciaio ad alto limite di snervamento, bonificato e denominato con la lettera Q, derivando dal termine inglese “Quenched and tempered” ed infine l’acciaio con elevata resistenza alla corrosione atmosferica denominato “Weathering” e classificato con la lettera W.

La norma UNI EN 10027 [2][3] propone due tipologie di designazione: simbolica e numerica.

Di seguito si riportano tre esempi illustrativi che descrivono la simbologia per ogni designazione.

La figura seguente è un esempio per profili e lamiere secondo la norma UNI EN 10025-2 [4]. Nella nomenclatura per profili, piatti e lamiere secondo la UNI EN 10025-3 [4] e UNI EN 10025-4 [4] scompare il termine "J o". Ad esempio: S 355 M/ML (N/NL).

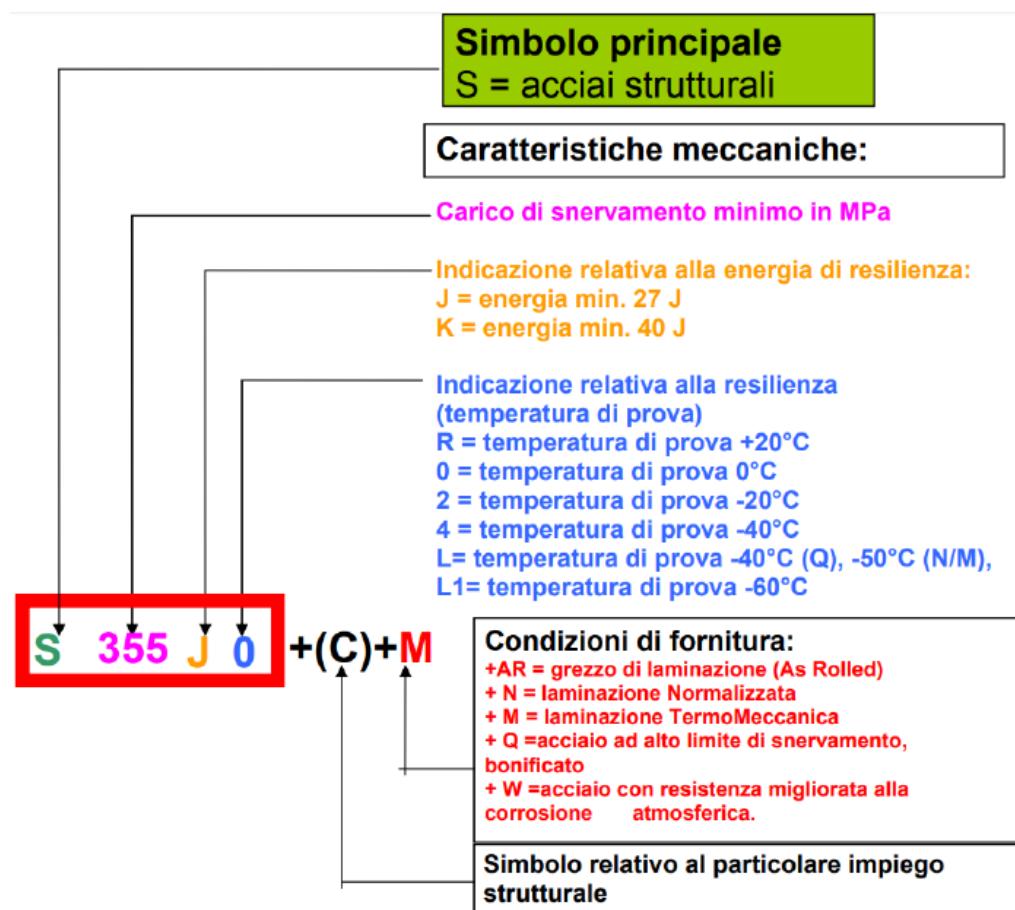


Figura 6.1 - Descrizione simbolica di acciai non legati per impieghi strutturali

La figura seguente invece è un esempio di designazione simbolica di profili cavi finiti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali secondo la norma UNI EN 10210-1÷2 [5].

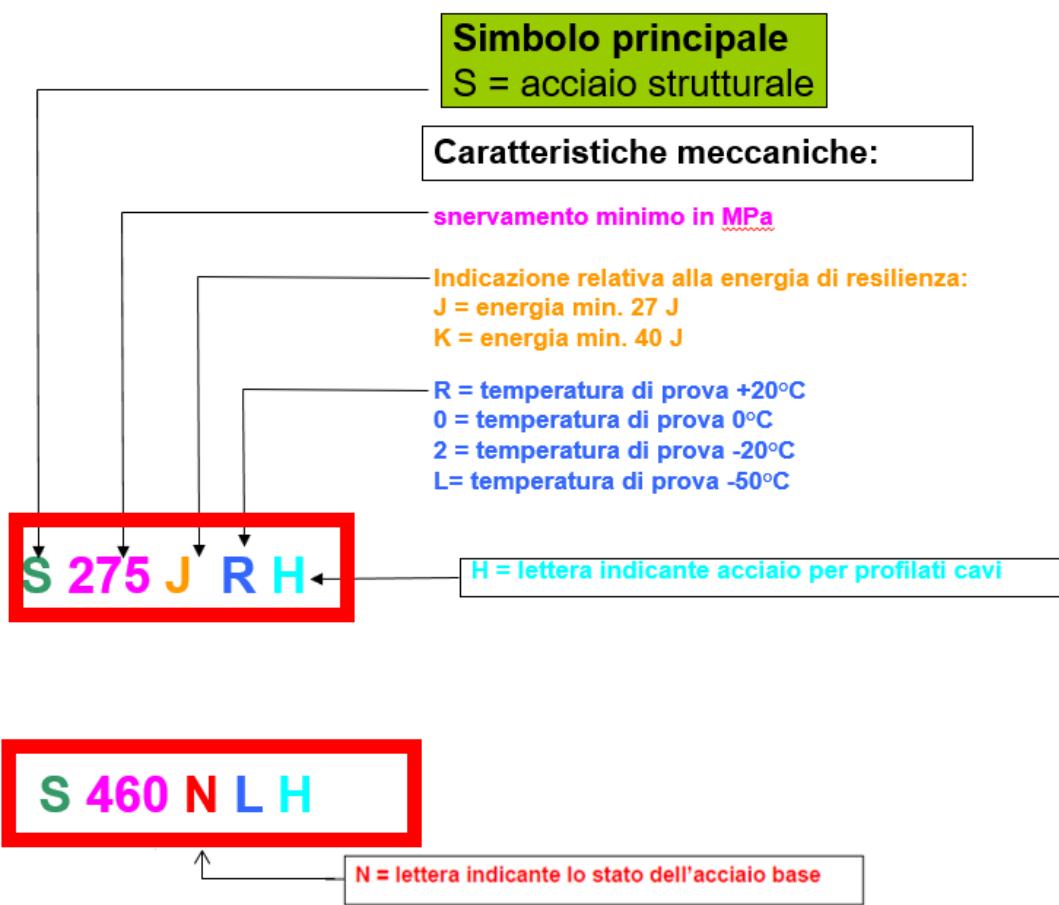


Figura 6.2 – Designazione simbolica di prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali-profilo cavi finiti a caldo da acciaio laminato a caldo non legato

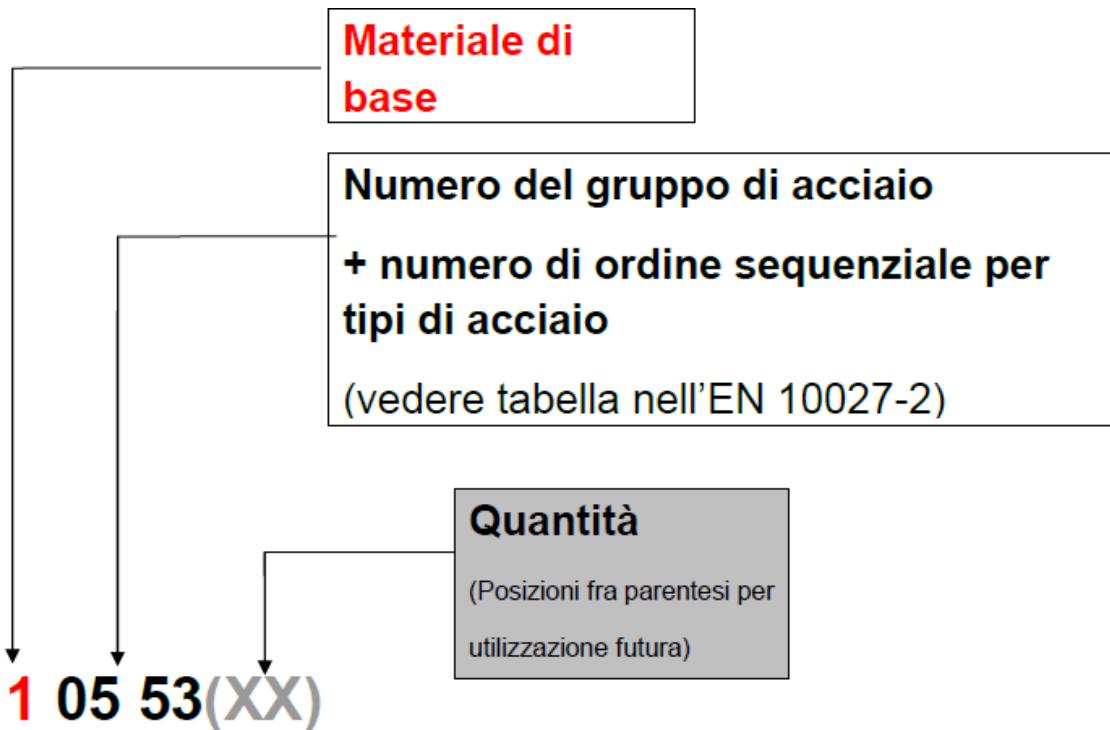


Figura 6.3 - Designazione numerica per profili cavi finiti a caldo a acciaio laminato a caldo a grano fine allo stato normalizzato.

È molto più diffuso l'impiego della designazione simbolica rispetto alla designazione numerica che è raramente utilizzata.

I ponti e i viadotti in carpenteria metallica in Italia sono solitamente realizzati con acciai aventi grado fino a S355 ($f_{yk} < 355 \text{ N/mm}^2$), ma sono in aumento i casi in cui viene utilizzato l'acciaio ad alta resistenza S460 ($f_{yk} 460 \text{ N/mm}^2$), previsto sia dalle Norme Tecniche delle Costruzioni sia dagli Eurocodici in vigore.

Caratteristiche delle tipologie di acciai

Gli acciai da costruzione hanno un tenore di carbonio tra 0.17% e 0.22% circa.

I prodotti in acciaio impiegati nelle costruzioni metalliche presentano due tipi di caratteristiche che intervengono nei calcoli di resistenza dei materiali. Si tratta, da una parte, delle caratteristiche meccaniche intrinseche, funzione del tipo di acciaio, e dall'altra parte delle caratteristiche geometriche, che dipendono dalle dimensioni e dalla geometria.

Tra le proprietà degli acciai, quella di resistere alla rottura fragile è denominata "tenacità"; il parametro che la caratterizza è la resilienza che si esprime in energie di rottura (KV). La resilienza costituisce un elemento fondamentale per la scelta degli acciai destinati alla costruzione metallica, in modo particolare per le strutture sollecitate a carichi ciclici e/o dinamici e sottoposte a basse temperature. Le norme stabiliscono il valore minimo della resilienza a diverse temperature.

Le Caratteristiche meccaniche fondamentali degli acciai sono:

- Il carico unitario di snervamento minimo dell'acciaio: R_{eH} [N/mm²]
- La resistenza a trazione (a rottura): R_m [N/mm²]
- L'allungamento a rottura dell'acciaio: ϵ [%]
- Il modulo di elasticità: E [N/mm²]
- L'energia di rottura o resilienza KV [J]
- La saldabilità Cev

- Resistenza a trazione:

I valori nominali f_y (tensione caratteristica di snervamento) e f_t (tensione caratteristica di rottura) introdotti dalla precedente normativa NTC 08 e richiamati nell'attuale NTC 18 al § 11.3.4.11.1.3, da utilizzare nei calcoli di resistenza, possono assumere rispettivamente i valori di R_{eH} e R_m riportati nelle relative norme di prodotto.

Dal punto di vista del comportamento meccanico, gli acciai da carpenteria (a basso contenuto di carbonio) sono caratterizzati da un legame costitutivo $\sigma-\epsilon$ simmetrico a trazione ed a compressione, in cui è possibile individuare tre fasi. Una prima fase elastica pressoché lineare fino al raggiungimento della tensione di snervamento R_{eH} ; una seconda fase plastica in cui la deformazione cresce a carico pressoché costante, una terza fase incrudente in cui il carico riprende a crescere fino al raggiungimento del carico massimo R_m .

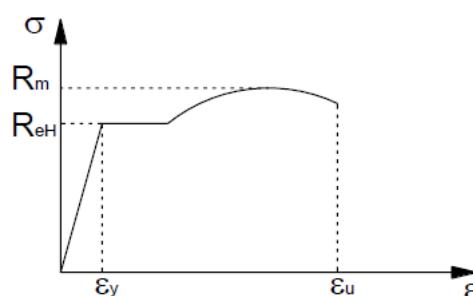


Figura 6.4 - Legame costitutivo acciaio da carpenteria.

- L'allungamento a rottura dell'acciaio $\epsilon\%$:

Raggiunto il carico massimo, per effetto del fenomeno della strizione, la tensione inizia a diminuire fino al raggiungimento della deformazione ultima ϵ_u e quindi alla crisi del materiale per eccesso di deformazione. È utile ricordare come l'andamento decrescente sia solo in quanto conseguenza della contrazione laterale che si realizza con il fenomeno della strizione.

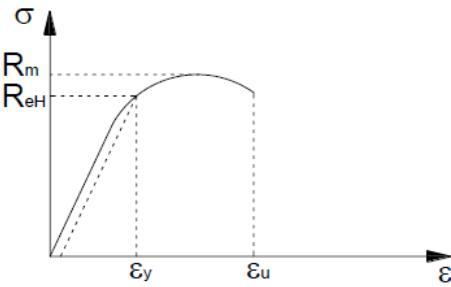


Figura 6.5 - Diminuzione della tensione a causa del fenomeno della strizione

Questo dato caratterizza in parte la capacità di deformazione dell'acciaio.

Nel caso di superamento accidentale del limite elastico l'allungamento può apparire come una riserva di sicurezza che può evitare il crollo dell'opera.

- Il modulo di elasticità o modulo di Young "E":

È il coefficiente di proporzionalità tra le tensioni e le deformazioni (o carico-allungamento) in campo elastico. È un dato costante per tutti gli acciai: $E = 210\ 000\ N/mm^2$.

Ha una incidenza diretta sulla deformazione (freccia) degli elementi sollecitati a flessione.

- L'energia di rottura KV o resilienza

L'energia di rottura è misurata con prove di impatto su una provetta con intaglio a V, prelevata nel senso lungo di laminazione del prodotto da controllare.

Le norme UNI EN 10025 [4], UNI EN 10210 [5] e UNI EN 10219 [6] prevedono, in funzione del livello di qualità dell'acciaio, le caratteristiche di resilienza (in Joule "J") a diverse temperature.

- La saldabilità

La nozione di saldabilità metallurgica degli acciai detti "al carbonio" dipende dal livello di carbonio equivalente Cev. Per le costruzioni saldate è opportuno scegliere degli acciai con valore di Cev il più basso possibile:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Per ogni grado di acciaio esistono tabelle dove è indicata la % massima di carbonio equivalente per spessore di materiale.

Particolari precauzioni devono essere prese nei confronti della suscettibilità delle cricche a caldo, che è maggiore per i grossi spessori. Per acciai ad alta resistenza è stata introdotta la qualità "Z" che controlla la suscettibilità delle cricche attraverso gli spessori, le temperature di esercizio e qualità specifica dell'acciaio. Questo fenomeno dipende dalla Cev, dal valore dell'idrogeno diffusibile nel materiale da saldare, dalla microstruttura della zona termicamente alterata e dalle tensioni presenti nel giunto saldato. Di conseguenza è importante definire una procedura di saldatura tenendo conto dello spessore del materiale base, del calore specifico di input, del metodo di saldatura e delle caratteristiche di saldabilità del materiale.

6.1.1 Acciai non legati per impieghi strutturali

Gli acciai non legati sono in accordo alla norma UNI EN 10025-2 [4] e sono disponibili negli stati di fornitura AR, M ed N. Possono essere suddivisi a seconda delle loro caratteristiche meccaniche in funzione della

resilienza e dei carichi unitari di snervamento.

In funzione della temperatura la norma stabilisce due valori minimi di resilienza 27 J e 40 J. A 20 °C e resilienza 27 J la nomenclatura dell'acciaio è JR.

A 0 °C la nomenclatura dell'acciaio è rispettivamente Jo e Ko.

A -20 °C la nomenclatura dell'acciaio è rispettivamente J2 e K2.

Designazione	UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	ReH (Mpa)								
			Spessori Nominali (mm)								
		t ≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400	
S235JR	1.0038										
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	165 (solo J2)	
S235J2	1.0117										
S275JR	1.0044										
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	195 (solo J2)	
S275J2	1.0145										
S355JR	1.0045										
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	265 (solo J2/K2)	
S355J2	1.0577										
S355K2	1.0596										
S450J0	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-	

Tabella 6.2 - Carico unitario minimo di snervamento dei tipi di acciaio in riferimento allo spessore
Dati ricavati dalla norma UNI EN 10025-2[4]

Designazione	Rm (Mpa)					
	Spessori Nominali (mm)					
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t < 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 200 ≤ 250
S235JR	10.038					
S235J0	10.114	360 - 510	360 - 510	350 - 500	340 - 490	330 - 480 (solo J2)
S235J2	10.117					
S275JR	10.044					
S275J0	10.143	430 - 580	410 - 560	400 - 540	380 - 540	380 - 540 (solo J2)
S275J2	10.145					
S355JR	10.045					
S355J0	10.553	510 - 680	470 - 630	450 - 600	450 - 600	450 - 600 (solo J2/K2)
S355J2	10.577					
S355K2	10.596					
S450J0	10.590	-	550 - 720	530 - 700	-	-

Tabella 6.3 - Resistenza a trazione dei tipi di acciaio in riferimento allo spessore
Dati ricavati dalla norma UNI EN 10025-2[4]

6.1.2 Acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine

Le normative EN 10025-3 [4] ed EN 10025-4 [4] distinguono gli acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine in due categorie:

- grano fine allo stato normalizzato laminato (N) EN 10025-3 [4];
- grano fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica (M) EN 10025-4 [4].

La laminazione di normalizzazione è un processo in cui la deformazione finale è effettuata in un determina-

to campo di temperatura in grado di sviluppare una condizione del materiale equivalente a quella ottenuta dopo un trattamento di normalizzazione.

La laminazione termomeccanica è un processo in cui la deformazione finale è effettuata in un determinato campo di temperatura in grado di sviluppare una condizione del materiale con elevate proprietà meccaniche che non possono essere ottenute o ripetute mediante il solo trattamento termico.

Per entrambe le categorie si utilizza la lettera L per identificare i valori di resilienza determinati a temperature di -40/-50 °C.

Gli acciai allo stato normalizzato sono definiti dalla EN 10025-3 [4] come quegli acciai aventi struttura del grano con un indice equivalente della grossezza del grano ferritico >6 aventi le seguenti caratteristiche:

Designazione		ReH (Mpa)								Rm (Mpa)		
		Spessori Nominali (mm)								Spessori Nominali (mm)		
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t ≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	t ≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N S275NL	10.490 10.491	275	265	255	245	235	225	215	205	370-510	350-480	350-480
S355N S355NL	10.545 10.546	355	345	335	325	315	295	285	275	470-630	450-600	450-600
S420N S420NL	18.902 18.912	420	400	390	370	360	340	330	320	510-680	500-650	500-650
S460N S460NL	18.901 18.903	460	440	430	410	400	380	370	-	540-720	530-710	-

Tabella 6.4 - Valori di tensioni per acciai a grano fine normalizzati laminati
Dati ricavati dalla norma EN 10025-3[4]

Le condizioni tecniche di fornitura degli acciai per impieghi strutturali a grano fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica sono definiti dalla EN 10025-4 [4]:

Designazione		ReH (Mpa)						Rm (Mpa)					
		Spessori Nominali (mm)						Spessori Nominali (mm)					
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t ≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120	≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120	
S275M S275ML	18818 18819	275	265	255	245	245	240	370 - 530	360 - 520	350 - 510	350 - 510	350 - 510	
S355M S355ML	18823 18834	355	345	335	325	325	320	470 - 630	450 - 610	440 - 600	440 - 600	430 - 590	
S420M S420ML	18825 18836	420	400	390	380	370	365	520 - 680	500 - 660	480 - 640	470 - 630	460 - 620	
S460M S460ML	18827 18838	460	440	430	410	400	385	540 - 720	530 - 710	510 - 690	500 - 680	490 - 660	

Tabella 6.5 - Valori di resilienza per acciai grano fine ottenuti mediante laminazione termomeccanica
Dati ricavati dalla norma EN 10025-4[4]

Gli acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato/normalizzato (EN 10025-3 [4]) e ottenuti mediante laminazione termo meccanica (EN 10025-4 [4]) presentano caratteristiche migliori in termini di resilienza e saldabilità rispetto agli acciai non legati per impieghi strutturali di grado "J2" (EN 10025-2) [4].

6.1.3 Acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione

Gli acciai patinabili (detti anche autopatinati o autopatinabili) per composizione chimica e caratteristiche meccaniche, sono definiti dalla normativa UNI EN 10025-5 [4], come acciai "con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica". Sono acciai basso legati con la proprietà di rivestirsi di una patina di ossidi che, in determinate condizioni di esposizione ambientale, esplica un effetto passivante. La patina è abbastanza stabile da impedire o ritardare il progressivo estendersi della corrosione. Essa assume una colorazione rossastra, che varia di tonalità col passare del tempo, fino a determinare una colorazione bruna molto simile ai composti prodotti dalla corrosione del ferro e, quindi, alla ruggine.

Gli acciai autopatinabili possono essere suddivisi a seconda delle loro caratteristiche meccaniche in funzione della resilienza e dei carichi unitari di snervamento:

In funzione della temperatura la norma stabilisce dei valori minimi di resilienza: a 0 °C la nomenclatura dell'acciaio è rispettivamente J0 mentre a -20 °C la nomenclatura dell'acciaio è rispettivamente J2 e K2.

Designazione		ReH (Mpa)						Rm (Mpa)		
		Spessori Nominali(mm)								
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t ≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	t < 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150
S235J0W S235J2W	1.8958 1.8961	235	225	215	215	215	195	360-510	360-510	350-500
S275J0WP S275J2WP	1.8945 1.8946	355	345	-	-	-	-	510-680	470-630	-
S355J0W S355J2W S355J2W	1.8959 1.8965 1.8967	355	345	335	325	315	295	510-680	470-630	450-600

Tabella 6.6 - Valori di carico unitario di snervamento minimo ReH e Resistenza a trazione Rm per acciai con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica - Dati ricavati dalla norma EN 10025-5[4]

Secondo la normativa sono designati con la lettera W, derivante da Weathering Steel, denominazione con cui sono noti nel mondo anglosassone.

Di questa grande famiglia fanno parte gli acciai COR-TEN® (autopatinabili), composti da piccole quantità (<1%) di rame, cromo, nichel e fosforo. Il loro nome deriva da un brevetto portato avanti dalla US Steel Corporation, che nel 1933 ha appunto ideato un acciaio che potesse resistere alla corrosione atmosferica. Tale nome è strettamente connesso alle caratteristiche offerte dal prodotto, ovvero la resistenza alla corrosione e alla trazione (dall'inglese CORrosion resistance e TENSile strength).

6.1.4 Acciai per profilati cavi finiti a caldo e formati a freddo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali

I profilati cavi finiti per impieghi strutturali possono essere formati a caldo o prodotti con processo di saldatura (formati a freddo) e sono fabbricati in accordo alle normative armonizzate di riferimento: UNI EN 10210-2 [5] e UNI EN 10219-2 [6] e devono obbligatoriamente riportare la marcatura CE.

Profilati cavi finiti a caldo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali

Tutti i tipi di profilati cavi laminati a caldo (quadri, rettangolari, circolari) finiti con processi di deformazione a caldo sono prodotti in accordo alla norma UNI EN 10210 [5].

Designazione		ReH (Mpa)							Rm (Mpa)			Allungamento minimo A ^{(a)(b)} (%)				Valore minimo di resilienza KV ^(d) (J)		
		Spessori Nominali(mm)							Spessori Nominali(mm)			Spessori specificato(mm)				Alla temperatura di prova		
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t ≤ 16	≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	t ≤ 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 120	t ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 100	>100 ≤ 120	- 20°C	0 °C	20 °C	
S235JRH ^(c)	1.0039	235	225	215	215	215	195	360-510	360-510	350-500	26	25	24	22	-	-	27	
S275J0H ^(c)	1.0149	275	265	255	245	235	225	430-580	410-560	400-540	23	22	21	19	-	27	-	
S275J2H	1.0138														27	-	-	
S355J0H ^(c)	1.0547	355	345	335	325	315	295	510-680	470-630	450-600	22	21	20	18	-	27	-	
S355J2H	1.0576														27	-	-	
S355K2H	1.0512														40 ^(e)	-	-	

Tabella 6.7 – Caratteristiche meccaniche dei profilati cavi di acciaio non legato per impieghi strutturali
Dati ricavati dal prospetto A.3 della norma UNI EN 10210-1:2006

Note:

- (a) Valori longitudinali. I valori trasversali sono minori del 2%.
- (b) Per spessori <3 mm, vedere punto 9.2.2 della norma UNI EN 10210-1:2006 [5].
- (c) Le caratteristiche di resilienza sono verificate solo quando è specificata l'opzione 1.3.
- (d) Per le caratteristiche di resilienza i provini a sezione ridotta, vedere punto 6.6.2 della norma UNI EN 10210-1:2006 [5].
- (e) Questo valore corrisponde a 27 J a -30 °C (Vedere EN 1993-1-1) [26]

Designazione		ReH (Mpa)			Rm (Mpa)		Allungamento minimo A (%)		Valore minimo di resilienza KV ^(a) (J)	
		Spessore specificato (mm)			Allo spessore nominale ≤65 mm	Allo spessore specificato ≤ 65 mm		Alla temperatura di prova di		
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2 [3]	t ≤ 16	≥ 16 ≤ 40	> 40 ≤ 65		Longitudinale	Trasversale	-50°C	-20°C	
S275NH	1.0493	275	265	255		370-510	24	22	-	40 ^(b)
S275NLH	1.0497								27	-
S355NH	1.0539	355	345	335	470-630	22	20	-	40 ^(b)	
S355NLH	1.0549							27	-	
S420NH	1.8750	420	400	390	520-680	19	17	-	40 ^(b)	
S420NLH	1.8751							27	-	
S460NH	1.89953	460	440	430	540-720	17	15	-	40 ^(b)	
S460NLH	1.8956							27	-	

Tabella 6.8 – Caratteristiche meccaniche dei profilati cavi di acciaio a grano fine per impieghi strutturali
Dati ricavati dal prospetto B.3 della norma UNI EN 10210-1:2006

Note:

- (a) Per le caratteristiche di resilienza dei provini a sezione ridotta, vedere punto 6.6.2 della norma UNI EN 10210-1:2006 [5]
- (b) Questo valore corrisponde a 27 J a -30 °C (vedere EN 1993-1-1) [26].

Profilati cavi saldati formati a freddo per impieghi strutturali di acciai non legati e a grano fine.

Tutti i tipi di profilati cavi (quadri, rettangolari, circolari), prodotti mediante processi di deformazione di laminati piani e successiva saldatura longitudinale o elicoidale, sono in accordo alla norma UNI EN 10219 [6].

Designazione		ReH (Mpa)		Rm (Mpa)		Allungamento minimo A ^{(a)(b)} (%)	Valore minimo di resilienza KV ^(c) (J)		
		Spessori Nominali(mm)		Spessore Nominale(mm)			Alla temp. di prova °C		
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2[3]	t ≤ 16	> 16 ≤ 40	<3	≥3≤ 40	≤ 40	-20	0	20
S235JRH	1.0039	235	225	360-510	360-510	24 ^(b)	-	-	27
S275J0H	1.0149						-	27	-
S275J2H	1.0138	275	265	430-580	410-560	20 ^(c)	27	-	-
S355J0H	1.0547						-	27	-
S355J2H	1.0576	355	345	510-680	470-630	20 ^(c)	27	-	-
S355K2H	1.0512						40 ^(d)	-	-

*Tabella 6.9 – Caratteristiche meccaniche dei profilati cavi di acciaio non legato con spessori <40 mm
Dati ricavati dal prospetto A.3 della norma UNI EN 10219-1:2006[6]*

Note:

- (a) Le caratteristiche di resilienza sono da verificare solo quando è specificata l'opzione 1.3
- (b) Per spessori >3 mm e dimensioni dei profilati D/T <15 (a sezione circolare) e (B+H)/2T <12.5 (a sezione quadrata e sezione rettangolare), l'allungamento minimo è ridotto di 2. Per spessori <3 mm, il valore minimo dell'allungamento è 17%.
- (c) Per dimensioni dei profilati D/T < 15 (a sezione circolare) e (B+H)/2T < 12.5 l'allungamento minimo è ridotto di 2.
- (d) Per spessori <3 mm, vedere punto 9.2.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (e) Per le caratteristiche di resilienza dei provini a sezione ridotta, vedere punto 6.7.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (f) Questo valore corrisponde a 27J a -30°C (vedere EN 1993-1-1) [26].

Designazione		ReH (Mpa)		Rm (Mpa)	Allungamento minimo A ^{(a)(b)} (%)	Valore minimo di resilienza KV ^(c) (J)	
		Spessori Nominali(mm)		Spessore Nominale(mm)	Spessori Nominali(mm)	Alla temp. di prova	
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2[3]	t ≤ 16	> 16 ≤ 40	≤ 40	≤ 40	-50°C	-20°C
S275NH	1.0493				24	-	40 ^(d)
S275NLH	1.0497	275	265	370-510		27	-
S355NH	1.0539				22	-	40 ^(d)
S355NLH	1.0549	355	345	470-630		27	-
S460NH	1.8953			540-720	17	-	40 ^(d)
S460NLH	1.8956	460	440			27	-

Tabella 6.10 – Caratteristiche meccaniche dei profilati cavi con spessori < 40mm – Condizione della materia prima N - Dati ricavati dalla tabella B.4 della norma UNI EN 10219-1:2006[6]

Note:

- (a) Per dimensioni dei profilati $D/T < 15$ (a sezione circolare) e $(B+H)/2T < 12.5$ (a sezione quadrata e sezione rettangolare), l'allungamento minimo è ridotto di 2.
- (b) Per spessori di <3 mm, vedere punto 9.2.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (c) Per le caratteristiche di resilienza dei provini a sezione ridotta, vedere punto 6.7.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (d) Questo valore corrisponde a 27J a -30°C (vedere EN 1993-1-1) [26].

Designazione		ReH (Mpa)		Rm (Mpa)	Allungamento minimo A ^{(a)(b)} (%)	Valore minimo di resilienza KV ^(c) (J)	
		Spessori Nominali(mm)		Spessore Nominale(mm)	Spessori Nominali(mm)	Alla temp. di prova	
UNI EN 10027-1 [2]	UNI EN 10027-2[3]	t ≤ 16	> 16≤ 40	≤ 40	≤ 40	-50°C	-20°C
S275MH	1.8843				24	-	40 ^(d)
S275MLH	1.8844	275	265	360-510		27	-
S355MH	1.8845				22	-	40 ^(d)
S355MLH	1.8846	355	345	450-610		27	-
S420MH	1.8847				19	-	40 ^(d)
S420MLH	1.8848	460	400	500-660		27	-
S460MH	1.8849				17	-	40 ^(d)
S460MLH	1.8850	460	440	530-720		27	-

Tabella 6.11 - Caratteristiche meccaniche dei profilati cavi con spessori < 40mm – Condizione della materia prima M - Dati ricavati dalla tabella B.5 della norma UNI EN 10219-1:2006[6]

Note:

- (a) Per dimensioni dei profilati $D/T < 15$ (a sezione circolare) e $(B+H)/2T < 12.5$ (a sezione quadrata e sezione rettangolare), l'allungamento minimo è ridotto di 2.
- (b) Per spessori di <3 mm, vedere punto 9.2.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (c) Per le caratteristiche di resilienza dei provini a sezione ridotta, vedere punto 6.7.2 della norma UNI EN 10219-1:2006 [6].
- (d) Questo valore corrisponde a 27J a -30°C (vedere EN 1993-1-1) [26].

6.1.5 Acciaio inox e duplex

Gli acciai inox sono leghe a base di ferro e carbonio che contengono anche altri elementi, quali principalmente cromo, nichel, molibdeno, manganese, silicio, titanio che li rendono particolarmente resistenti alla corrosione sia in ambienti fortemente acidi sia in ambienti caustici.

Gli acciai austeno ferritici (duplex) sono una famiglia di tipologie che unisce alla buona resistenza alla corrosione l'elevata resistenza meccanica e la semplicità nella lavorazione.

Essi presentano una resistenza meccanica significativamente superiore rispetto ai gradi austenitici, mantenendo allo stesso tempo una buona duttilità e tenacità.

All'estero vi sono numerosi casi di ponti di grande luce costruiti in acciaio inox in particolare dove la necessità di sopportare carichi elevati sposa quella di preservare la struttura dalla corrosione per la presenza di un ambiente salino. Hanno inoltre avuto un diffuso impiego in piattaforme offshore: l'elevata resistenza di questi acciai consente infatti la riduzione degli spessori di parete e quindi del peso delle piattaforme, ma in Italia questo tipo di acciaio è utilizzato prevalentemente per opere secondarie come corrimani, parapetti ed altro. Da sottolineare che i valori minimi di riferimento, delle proprietà meccaniche di lamierate in acciaio inossidabile duplex, partono da un carico di snervamento di 400 MPa.

La normativa italiana dalla pubblicazione delle NTC 2008 ha aperto dunque le porte alla progettazione con acciai alto resistenziali; infatti al capitolo 4 dell'attuale normativa si danno indicazioni relative alla qualità degli acciai, introducendo acciai con un carico di snervamento oltre i 400 MPa ma non approfondisce la progettazione con gli acciai duplex e inossidabili in genere. Anche le nuove norme Tecniche per le costruzioni del 2018 [24] non hanno introdotto alcun aggiornamento in questo ambito, pertanto si evince che per gli acciai inox è necessario far riferimento agli Eurocodici, in particolare UNI EN 1993-1-4 [26]: Progettazione delle strutture di acciaio - Regole generali e supplementari per acciai inossidabili.

6.1.6 Collegamenti

L'elemento di unione è composto da: vite, dado e rondelle. Esso è definito "assieme".

Gli assiemi ad uso strutturale previsti nelle NTC 2018 [24] devono essere prodotti in ottemperanza alle norme armonizzate UNI EN 14399 [15], "Bulloneria strutturale ad alta resistenza a serraggio controllato" e UNI EN 15048 [16], "Assiemi di bulloneria strutturale non da precarico - Parte 1: Requisiti generali".

Nell'ipotesi in cui il giunto richieda soluzioni a serraggio controllato, caso molto adatto per le unioni sugli elementi dei ponti perché sottoposti a carichi ciclici, i sistemi di unione devono essere prescelti fra quelli indicati dalle norme EN 14399-3 [15] (sistema HR) o dalla norma EN 14399-4 [15] (sistema HV - elementi di unione precaricati o "a serraggio controllato"). Entrambi sono sistemi con marcatura CE. In merito alle classi di resistenza, tali assiemi possono essere utilizzati con viti nelle classi 8.8, e 10.9. I bulloni per giunzioni ad attrito, viti e dadi, devono essere conformi alle prescrizioni riportate nel § 11.3.4.6 del D.M. 17 gennaio 2018 [24].

Il serraggio dei bulloni deve rispettare quanto evidenziato al 4.2.8.1.1 della norma (NTC 2018 [24]), formula (4.2.6.1) sotto riportata:

$$M = k \cdot d \cdot F_{p,c} = k \cdot d \cdot 0,7 \cdot A_{res} \cdot f_{tbk}$$

Dove d è il diametro del bullone, A_{res} è l'area resistente del bullone e f_{tbk} è la resistenza a rottura del materiale del bullone. Il valore del fattore k dipende dalla classe funzionale specifica del bullone utilizzato (vedi tab. 4.2 XV della NTC 2018 [24]).

In presenza di soluzioni non precaricate e di sollecitazioni prevalenti di taglio, i sistemi più appropriati risultano essere i sistemi SB, dalla norma armonizzata UNI EN 15048-1 [16] (Elementi di unione non precaricati o a "non a serraggio controllato").

I sistemi di unione precaricati precedentemente citati sono utilizzabili anche in giunzioni a taglio in alternativa alla soluzione SB.

Se la scelta progettistica è orientata al sistema SB, particolare attenzione deve essere posta, al momento della posa in opera degli elementi di unione.

La norma EN 15048-1 [16] ammette la composizione dell'insieme di assemblaggio utilizzando componenti provenienti da bulloneria standard ISO. È però importante essere sicuri che tali componenti siano identificati e contrassegnati in modo chiaro e univoco con il marchio SB, stampigliato sulla testa della vite sulla superficie del dado, in accordo alla norma EN 15048-1 [16]. Il marchio CE per questi prodotti è anch'esso obbligatorio, e deve essere esposto obbligatoriamente sulle etichette che identificano le singole confezioni. In merito alle classi di resistenza, tali assiemi possono essere utilizzati con viti nelle classi 4.6 - 4.8 - 5.6 - 5.8 - 6.8 - 8.8 e 10.9.

La norma (NTC 2018 [24]) al punto 4.2.8.1 indica che nei collegamenti con bulloni "non precaricati" gli assiemi Vite/Dado/Rondella devono essere conformi a quanto specificato nel § 11.3.4.6.1, nel quale è stabilito che per questa tipologia di assiemi (Vita/Dado/Rondella) i prodotti devono essere conformi alla norma europea armonizzata EN 15048-1 [16]. Si sottolinea che, essendo prodotti fabbricati in conformità ad una norma armonizzata, si applica quanto specificato al punto A del § 11.1 ovverosia questi sono marcati CE. Comunque, soltanto gli assiemi viti/dadi sono coperti dalla marcatura CE, viti e dadi fabbricati e testati separatamente e non come un assieme di assemblaggio non possono essere marcati CE.

È necessario che il serraggio dei bulloni sia eseguito in accordo alla norma UNI EN 1090-2 [25] ed infine che gli assiemi siano associati come indicato in tabella 11.3.XIII.a delle NTC 2018 [24]; in particolare per l'acciaio al carbonio le viti devono appartenere alle classi riportate in tabella. Nella norma non sono definiti requisiti geometrici, ma viene dato come riferimento la norma EN ISO 898-1 [17], come sotto riportato in tabella:

Viti	Dadi	Rondelle	Riferimento
Classe di resistenza UNI EN ISO 898-1 [17]	Classe di resistenza UNI EN ISO 898-2 [17]	Durezza	
4.6	4;5:6 oppure 8		
4.8			
5.6	5;6 oppure 8		
5.8			
6.8	6 oppure 8	100 HV min.	
8.8	8 oppure 10	100 HV min. oppure 300 HV min.	
10.9	10 oppure 12		UNI EN 15048-1 [16]

Tabella 6.12 – Tab. 11.3.XIII.a tratta dalle NTC 2018 [24]

Da sottolineare che le NTC 2018 [24] (approvate prima dell'aggiornamento della UNI EN 15048-1 [16]), fanno riferimento ancora agli assiemi con dadi di classe 4, che, a partire della fine del periodo di coesistenza della UNI EN 15048-1 [16], non sono più prodotti in questa classe né abbinati ad alcun assieme, infatti per i dadi l'attuale norma fa riferimento alle classi 5, 6, 8, 10 e 12 ed alle norme ISO 898-2 [17].

Al § 11.3.4.6.3 delle NTC 2018 [24], infine, vengono inseriti i collegamenti in acciaio inossidabile, che le precedenti NTC non prevedevano.

Questo tipo di bulloneria è molto utilizzata per gli elementi secondari in quei casi dove prevale la valenza estetica del manufatto. La normativa prescrive che gli elementi di collegamento, costituiti dagli assieme vite/dado/rondella in acciaio inossidabile resistente alla corrosione devono essere conformi alle prescrizioni della UNI EN ISO 3506-1÷4 [29]. Da sottolineare che le norme citate non sono armonizzate perciò non è prevista la marcatura CE dell'assieme; tuttavia deve essere rispettato quanto indicato al § 11.3.4.10 per le officine per la produzione di bulloni e chiodi. Per quanto riguarda il materiale base, invece, l'acciaio da utilizzare deve essere conforme alle norme armonizzate EN 10088-4÷5 [33], materiale quindi recante la marcatura CE.

6.2 Trattamenti protettivi e materiali autopassivanti

La corrosione è un fenomeno di graduale deterioramento di un materiale metallico per interazione con l'ambiente circostante. Essa avviene nello strato di umidità (condensa) onnipresente sulla superficie del metallo, spesso non visibile a occhio nudo, secondo processi di ossido-riduzione tra l'acciaio e l'ossigeno atmosferico. La velocità di corrosione viene condizionata da diversi fattori quali l'umidità relativa, l'aumento del tasso d'inquinamento in atmosfera e la concentrazione salina nella condensa.

L'acciaio è un materiale che, per sua natura, è vulnerabile alla corrosione in determinate situazioni, come l'esposizione ad aria umida soprattutto in ambienti molto aggressivi o inquinati. Per contrastarla si può intervenire sulle cause, rendendo l'acciaio meno vulnerabile mediante trattamenti di protezione superficiale o usando materiali in grado di passivarsi, ossia di formare sulla superficie patine di prodotti compatti e protettivi, ancorché sottili.

Il sistema di protezione deve perseguire l'isolamento della superficie del manufatto dall'ambiente esterno aggressivo ed essere in grado di inibire i processi di ossidazione che danno luogo alla corrosione atmosferica. Ciò, nella pratica, nelle strutture viene ottenuto attraverso l'utilizzo di acciaio a resistenza migliorata (vedi § 6.1.1.3) o l'applicazione all'acciaio al carbonio di trattamenti che comportino un rivestimento della superficie in grado di frapporsi tra l'acciaio e le specie aggressive (effetto barriera o protezione passiva). Tipicamente ciò accade, per i manufatti a comportamento strutturale, applicando dei sistemi polimerici (le vernici) o dei rivestimenti metallici (la zincatura a caldo), seguendo le indicazioni fornite nella UNI EN 1090-2 [25]. Si noti che, oltre alla protezione passiva, il rivestimento di zincatura a caldo manifesta anche una protezione di tipo elettrochimico (protezione attiva o catodica).

È ottimale ricorrere a rivestimenti in grado di fornire anche un'azione protettiva di tipo elettrochimico, per ottenere una maggiore affidabilità.

La corrosione, infatti, non è altro che il consumo di elettroni durante il processo ossidativo che porta alla formazione della ruggine (un insieme di ossidi, idrossidi ed altri composti del ferro) per interazione con l'ossigeno atmosferico in presenza di soluzioni conduttrive di sali presenti in ambiente. Una contromisura efficace in atmosfera consiste nel fornire continuamente elettroni al metallo da proteggere sfruttando il contatto galvanico con un altro metallo meno nobile, che ossidandosi ceda al materiale di base i suoi elettroni. È ciò che si realizza nel caso del contatto tra zinco (che cede elettroni e si ossida) e ferro dell'acciaio che si mantiene ridotto e, quindi, protetto.

Un criterio guida essenziale nella scelta del sistema protettivo deve portare alla massima durabilità possibile (intesa secondo la definizione data nel § 6.2.1.2), in modo da ridurre i costi per le manutenzioni. Il sistema deve essere, praticabile, affidabile, robusto, economicamente compatibile ed ecocompatibile e tale da facilitare le attività ispettive e manutentive, soprattutto nelle parti di difficile accessibilità. La durabilità dei materiali e della protezione superficiale deve essere garantita dalla corretta scelta dei materiali.

Il materiale o il suo trattamento anticorrosivo devono garantire i seguenti requisiti:

- protezione resistente ad urti ed abrasioni;
- protezione attiva (effetto barriera) e passiva (catodica);
- il massimo livello possibile di adesione alla superficie da proteggere;
- protezione anche in caso di superfici chiuse o non ispezionabili;
- la protezione per tutta la durata in esercizio del ponte con il minor numero possibile di manutenzioni, cioè in grado di durare per tutta la vita utile dell'opera idealmente senza interventi di manutenzione o riducendone al minimo la frequenza senza alcuna perdita di sicurezza strutturale. Questa indicazione non deve portare alla riduzione della sorveglianza che, al contrario, deve essere garantita con costanza e frequenza delle ispezioni da stabilirsi al momento della progettazione del sistema anticorrosivo al pari delle manutenzioni, per ovviare a danneggiamenti per imprevisti, condizioni locali di particolare aggressività o danni locali alla protezione per qualsivoglia motivo, variazione delle condizioni ambientali di esposizione, errori realizzativi eventuali che possano comportare il non corretto funzionamento in qualche punto del sistema anticorrosivo, etc.

La scelta del sistema anticorrosivo e la stesura del relativo piano delle manutenzioni deve essere effettuata sin dalle prime fasi progettuali tenendo conto degli ambienti aggressivi, delle opportune misure preventive già individuabili e delle corrette predisposizioni per l'applicazione a regola d'arte della protezione. Occorre favorire metodi e sistemi protettivi applicati in ambienti industriali controllati, piuttosto che demandare la protezione a fasi di cantiere.

6.2.1 Identificazione classe di corrosività

Dopo la definizione della "vita nominale" della struttura, il progettista deve prevedere l'individuazione e la classificazione della corrosività dell'ambiente nella zona in cui la struttura sarà ubicata (secondo la norma UNI EN ISO 9223-2012 [7]) e la conseguente identificazione della durabilità dei sistemi di protezione alla corrosione a seconda del tipo di protezione scelta:

- utilizzo di materiale auto-passivante,
- zincatura a caldo, realizzata secondo UNI EN ISO 1461:2009 [12], utili riferimenti si trovano nella normativa UNI EN ISO 14713-1:2017 [9] ed UNI EN ISO 14713-2:2010 [10]. Sono disponibili norme relative alla zincatura a caldo che recano una valutazione indicativa del consumo annuale di zinco nelle diverse condizioni ambientali di esposizione (vedi § 6.2.1.4 per importanti considerazioni).
- protezione mediante verniciatura la normativa di riferimento è la UNI EN ISO 12944-2:2018 [30].

In tutti i casi, si possono distinguere quattro principali condizioni di riferimento ovvero ambienti di esposizione:

- Rurale: alternanza di umidità e atmosfera secca – pressoché assenza di inquinanti;
- Urbana: alternanza di umidità e atmosfera secca – presenza di diossido di zolfo (SO₂)
- Marina: umidità relativamente alta – presenza di cloruri che accelerano la corrosione;
- Industriale: presenza di agenti chimici – livello di corrosione legato al tipo di sostanza inquinante rilasciata nell'aria.

Categoria di corrosività C Tasso di corrosione per lo zinco (in base a esposizioni di un anno), rcorr [$\mu\text{m}/\text{anno}$] e livello di corrosione	Ambienti interni (esempi)	Ambienti esterni (esempi)
"C1 rcorr < 0,1 Molto bassa"	Spazi non riscaldati con temperature e umidità relativa variabili. Bassa frequenza di condensa e ridotto inquinamento, per esempio magazzini, palestre	Zona temperata, ambiente atmosferico con inquinamento ridotto ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), per esempio aree rurali, piccole città. Zona secca o fredda, ambiente atmosferico con breve periodo di umidità, per esempio deserti, aree subartiche
"C3 $0,7 < \text{rcorr} < 2,1$ Media"	Spazi con moderata frequenza di condensa e inquinamento moderato dovuto a processi produttivi, per esempio impianti di lavorazione di generi alimentari, lavanderie, fabbriche di birra, caseifici	Zona temperata, ambiente atmosferico con inquinamento medio ($\text{SO}_2: 5 \div 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o un certo effetto di cloruri, per esempio aree urbane, aree costiere con bassa deposizione di cloruri. Zone subtropicali e tropicali con atmosfera con ridotto inquinamento
"C4 $2,1 < \text{rcorr} < 4,2$ Alta"	Spazi con elevate frequenze di condensa ed elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio impianti di lavorazione industriali, piscine	Zona temperata, ambiente atmosferico con elevato inquinamento ($\text{SO}_2: 30 \div 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o un certo effetto di cloruri, per esempio aree urbane inquinate, aree industriali, aree costiere non esposte a nebbia salina, esposizione a forte effetto di Sali anti ghiaccio. Zone subtropicali e tropicali con atmosfere con inquinamento medio
"C5 $4,2 < \text{rcorr} < 8,4$ Molto alta"	Spazi con elevatissima frequenza di condensa e/o elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio miniere, caverne per scopi industriali, capanne non ventilate in zone subtropicali e tropicali	Zone temperate e subtropicali, ambiente atmosferico con inquinamento molto elevato ($\text{SO}_2: 90 \div 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e/o importante effetto di cloruri, per esempio aree industriali, aree costiere, posizioni riparate sulla fascia costiera
"CX $8,4 \leq \text{rcorr} \leq 25$ Estrema"	Spazi con condensa quasi permanente o lunghi periodi di esposizione agli effetti di umidità estrema e/o con elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio capanne non ventilate in zone tropicali umide con penetrazione dell'inquinamento esterno, compresi cloruri dispersi nell'aria e materiale particolato stimolante la corrosione	Zone subtropicali e tropicali (periodo di umidità molto elevato), ambiente atmosferico con inquinamento molto elevato ($\text{SO}_2 > 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), compreso inquinamento dovuto a fattori produttivi e/o forte effetto di cloruri, per esempio aree estremamente industriali, fascia costiera e aree in mare aperto con contatto occasionale con nebbia salina

Tabella 6.13 Descrizione degli ambienti atmosferici tipici in relazione alla stima delle categorie di corrosività (UNI EN ISO 14713-1 [9] Rivestimenti di zinco - Linee guida e raccomandazioni)

CLASSE DI CORROSIVITÀ	Perdita di massa per unità di superficie (g/mm²) / perdita di spessore (µm)				Esempi di ambienti tipici (a titolo informativo)	
	ACCIAIO A BASSO C		ZINCO		ESTERNO	INTERNO
	MASSA	SPESORE	MASSA	SPESORE		
"C1 molto bassa"	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Edifici riscaldati con atmosfera pulita, ad esempio uffici, negozi, scuole, alberghi
"C2 bassa"	10 ÷ 200	1,3 ÷ 25	0,7 ÷ 5	0,1 ÷ 0,7	Ambienti con basso livello di inquinamento: aree molto rurali	Edifici non riscaldati dove può verificarsi condensa, ad esempio depositi e palazzetti dello sport
"C3 media"	200 ÷ 400	25 ÷ 50	5 ÷ 15	0,7 ÷ 2,1	Ambienti urbani e industriali con moderato inquinamento a base di SO ₂ , aree costiere con bassa salinità	Locali di produzione con alta umidità e con presenza di inquinamento, ad esempio impianti alimentari, lavanderie, fabbriche di birra, caseifici
"C4 alta"	400 ÷ 650	50 ÷ 80	15 ÷ 30	2,1 ÷ 4,2	Aree industriali e zone costiere con moderata salinità	Impianti chimici, piscine, cantieri costieri
"C5 molto alta"	650 ÷ 1500	80 ÷ 200	30 ÷ 60	4,2 ÷ 8,4	Aree industriali con alta umidità e atmosfera aggressiva e aree costiere con elevata salinità	Edifici o aree con condensa quasi permanente ed elevato inquinamento
"CX estrema"	1500 ÷ 5500	200 ÷ 700	60 ÷ 180	8,4 ÷ 25	Zone offshore con alta salinità, aree con estrema umidità, ambienti aggressivi ed ambienti subtropicali e tropicali	Aree industriali con estrema umidità e ambienti aggressivi

Tabella 6.14 – Categorie di corrosività atmosferica ed esempi di ambienti tipici (UNI EN ISO 12944-2[30] Pitture e vernici - Protezione dalla corrosione di strutture di acciaio mediante verniciatura - Parte 2: Classificazione degli ambienti)

Trattazione a parte merita la gestione degli scarichi risultanti dal dilavamento delle acque particolarmente cariche di cloruri per l'utilizzo durante la stagione invernale del sale di disgelo delle sedi stradali.

Detto anche "fondente", il sale è costituito prevalentemente da cloruro di sodio, cloruro di calcio e dal più costoso cloruro di magnesio. Questi tre composti sono corrosivi e possono determinare il deterioramento del manto stradale, del calcestruzzo e delle strutture in acciaio rivestito o autopatinabile.

È utile ricordare che lo ione cloruro per le sue ridotte dimensioni tende a diffondere rapidamente nel calcestruzzo raggiungendo le armature e determinandone l'ammaloramento dell'impalcato in carpenteria, altera le vernici causandone la delaminazione, il contatto con l'acciaio autopatinabile ne destabilizza la patina in modo da renderne il comportamento praticamente indistinguibile dall'acciaio normale non protetto, nell'acciaio zincato a caldo può accelerare la corrosione dello zinco. Sono in commercio anche inibitori di corrosione che possono essere additivati per moderare gli effetti sulle strutture metalliche ma gli effetti tossici sull'ambiente consigliano di limitarne l'utilizzo.

Ai fini della protezione dalla corrosione, l'utilizzo dei sali fondenti rende ancora più importante, se possibile, progettare in modo che non siano possibili accumuli di acqua sulla superficie delle strutture, che le acque inquinate dai cloruri vengano convogliate in canalizzazioni o gronde resistenti alla corrosione e rapidamente allontanate dalle strutture, e che si consideri una frequenza ottimale di ispezione per intercettare rapidamente eventuali infiltrazioni o inneschi alla corrosione.

6.2.2 Durabilità

La durabilità è il tempo previsto di durata dell'efficacia di una protezione anticorrosiva fino al primo importante intervento di manutenzione.

La verniciatura protettiva, realizzata secondo UNI EN ISO 12944-5 [30], ha una durabilità molto variabile, in base alla classe del trattamento protettivo e all'ambiente in cui si trova il manufatto metallico, generalmente può durare dai 2 ai 15 anni.

La zincatura a caldo, realizzata secondo UNI EN ISO 1461 [12], determina una protezione di durabilità molto lunga, quantificabile in svariati decenni. A seconda dell'ambiente di esposizione e dello spessore del rivestimento, possono essere facilmente superati i cinquanta anni e, in alcuni casi, anche il secolo senza esigenza di interventi di manutenzione.

Si può considerare un trattamento protettivo anche lo strato di "ossidi" che protegge l'acciaio autopatinabile, esso infatti crea una protezione impermeabile che protegge l'acciaio sottostante anche oltre i 30 anni nelle condizioni ideali di utilizzo.

Si consideri, però, che la valutazione della durabilità, per tutti i materiali e trattamenti protettivi, va effettuata in modo dettagliato se c'è la possibile presenza di punti in cui gli inquinanti, le specie reattive o le soluzioni conduttive, possano determinare un'aggressione localmente più forte. Ciò suggerisce che la protezione dalla corrosione (ovvero, per meglio dire, la sua progettazione) sia prevista in modo da evitare su tutta la superficie del manufatto condizioni che la rendano meno efficiente.

Manutenzione ordinaria

La durata in servizio di una struttura protetta è generalmente superiore alla durata del sistema protettivo adottato. In quest'ottica è necessaria la stesura di un programma di manutenzione, in accordo con l'attuale normativa tecnica, che permetta la fruibilità della struttura per tutto il periodo di servizio di riferimento (vita nominale).

Il programma deve prevedere una manutenzione ordinaria, da tenersi con cadenza regolare per tutta la vita nominale della struttura, a seconda della necessità scaturenti dal particolare trattamento protettivo adottato. È fondamentale che i committenti, la direzione lavori, i costruttori, i realizzatori del rivestimento protettivo e i controllori dei rivestimenti, siano a conoscenza di informazioni concise, complete e precise circa il sistema protettivo utilizzato per la struttura, in modo da permettere a tutti i soggetti coinvolti di interpretare correttamente le indicazioni al fine di consentire le verifiche e le successive operazioni manutentive. Colui che realizza il rivestimento protettivo dovrebbe fornire tutte le indicazioni per permettere la stesura del piano di manutenzione ordinaria.

È necessario eseguire un'ordinaria manutenzione al manifestarsi delle tracce della ruggine (per esempio, se si riscontra una presenza di ruggine su più del 5% di una struttura) e appena vengano riscontrate alterazioni del rivestimento protettivo (sfarinamenti, screpolature, vescicamento, danneggiamenti, distacchi, diffusione di prodotti della corrosione all'interno dei rivestimenti, ecc.).

Ispezione

Per ogni sistema anticorrosivo va stabilita una frequenza di ispezione onde verificare la tenuta del sistema stesso sia globalmente che nei punti in cui possano localmente verificarsi delle criticità o imprevisti (come, ad esempio, inevitabili criticità progettuali, danneggiamenti accidentali, variazione delle condizioni di esposizione).

Anche per trattamenti affidabili e di lunga durabilità come la zincatura a caldo, che in genere non richiede manutenzione se non dopo svariate decadi di esercizio, è consigliabile prevedere delle campagne ispettive a cadenza regolare (per esempio ogni 5-10 anni) per verificare che non ci siamo punti in cui, anche per cause occasionali non prevedibili, possa esserci un consumo anomalo del rivestimento.

6.2.3 La protezione e la durabilità degli acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione

Nel 1980 l'American Iron and Steel Institute (AISI) ha cominciato una campagna di ispezione su 52 ponti autostradali in acciaio autopatinabile i cui primi risultati sono riassunti in un report del 1982, dopodiché la ricerca è proseguita con altre due fasi, alla fine delle quali, nel 1995, sono stati analizzati complessivamente 63 ponti, aventi dai 18 ai 30 anni di servizio, concepiti senza alcuna prescrizione particolare e distribuiti in 11 Stati.

I risultati di questa ricerca furono soddisfacenti in quanto solo il 12% dei ponti presentava segni evidenti di corrosione e gli unici problemi riscontrati erano relativi a dei "micro ambienti" dove vi è la possibilità di accumulo di acqua che unita all'uso di sali disgelanti tende a corrodere il materiale. Le zone critiche sono i giunti di continuità, i pozzetti per lo scarico delle acque e gli irrigidenti in prossimità degli appoggi (questi problemi sono comuni anche negli impalcati da ponte realizzati in acciaio verniciato, non solo negli acciai autopatinabili).

L'acciaio patinabile, proprio grazie alla necessità di manutenzione ridotta nelle specifiche condizioni di utilizzo, viene spesso impiegato per la costruzione di ponti. Per il suo utilizzo occorre effettuare preventivamente una valutazione dell'applicabilità nell'ambiente aggressivo al quale sono destinati, così come è necessario, in particolare, preoccuparsi che nell'epoca posteriore all'installazione finale del manufatto non ci siano delle parti che accumulano umidità o che siamo prevalentemente o, addirittura, costantemente bagnate. Per avere la formazione dello strato protettivo di ossido sono necessari cicli umido/secco, l'utilizzo è da evitare dove l'umidità risulta elevata o dove vi sono possibili ristagni di acqua. È essenziale che ci sia un'alternanza di cicli asciutto/bagnato per periodi più o meno equivalenti, perché la patina possa formarsi.

L'analisi di compatibilità deve essere effettuata in ordine alla possibilità di formazione della patina e la valutazione della durabilità deve concernere la verifica della sussistenza delle condizioni per la sua stabilità nel tempo. Ciò è particolarmente importante se si considera che il comportamento alla corrosione, peculiare di questi acciai, implica un lento ma progressivo consumo del materiale di base. Quindi, un'eventuale accelerazione del fenomeno corrosivo può comportare nel tempo una riduzione delle sezioni resistenti e della sicurezza strutturale dell'opera. Occorre tenere conto in fase di progetto che l'acciaio patinabile, in condizioni di umidità atmosferica crescente e prevalente, si corrode progressivamente. Questo fenomeno diviene evidente se l'umidità (o l'utilizzo del materiale) comporta la creazione di condense permanenti o se vi è la presenza di parti costantemente bagnate (come quelle a contatto con la vegetazione o in presenza di

sacche di accumulo d'acqua).

In tal caso, il comportamento alla corrosione del materiale è sostanzialmente simile a quello di un comune acciaio non protetto. Simile è il caso di presenza di inquinamento da cloruri, tipico delle zone marine e costiere, e dell'utilizzo durante la stagione invernale del sale per il disgelo.

Comunque, in una condizione di più o meno lenta ma progressiva corrosione, occorrerà nella progettazione tenere conto della necessità o meno di sovrardimensionare, in dipendenza dell'aggressività dell'ambiente, per garantire che siano conservate le condizioni minime di sicurezza strutturale nel tempo della vita utile dell'opera. Nel caso di utilizzo di sezioni cave, tubi, profilati tubolari o cassonati, il rischio di corrosione interna è molto alto per la possibilità che si creino condense dell'umidità intrappolata, che accelerano la corrosione. È molto difficile ovviare a ciò, per esempio, garantendo per tempi lunghi la sigillatura delle parti vuote. A volte ciò è impossibile, per la necessità di rendere quelle parti ispezionabili. In alternativa, occorre garantire una corretta aerazione anche delle superfici interne (per il particolare di aerazione dei ponti a cassone si rimanda al capitolo 4.3.3).

Se gli agenti chimici inquinanti sono abbondanti, come avviene nelle zone industriali, nelle aree urbane inquinate ed in tutte le applicazioni che presuppongono un traffico veicolare intenso, occorre prestare particolare attenzione: la deposizione di specie carboniose, il mix di NO_x e SO₂, assieme alla concentrazione di sali, corrodono l'acciaio autopatinabile ad una velocità via via approssimabile all'acciaio non protetto.



Figura 6.6 - Aree delle travi soggette a stillicidio e ristagno di acque meteoriche



Figura 6.7 - Aree delle travi soggette a ristagno di acque meteoriche

Non si deve ricorrere alla verniciatura di acciai patinabili, a meno che non si eseguano interventi di recupero su strutture esistenti realizzate con profilo in acciaio autopatinabile. L'acciaio patinabile dovrebbe essere usato sempre tal quale. La verniciatura, infatti, impedisce la formazione della patina e la protezione dalla corrosione dipende, in questo caso soltanto, dall'efficacia della verniciatura, che sarebbe la stessa anche su un acciaio al carbonio "normale". Ciò si evince dai risultati di varie prove "su banco" ovvero risultati teorico/sperimentali. Se si concede all'acciaio autopatinabile di autopassivarsi uniformemente, con regolari cicli umido/asciutto, si registrano perdite di spessore, per ciascuna delle due facce esposte, dell'ordine di 0,2 mm in 10 anni, senza ulteriore progressione.

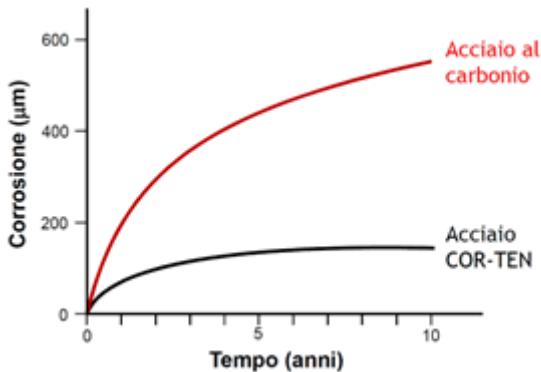


Figura 6.8 – Grafico di confronto perdita di spessore dovuto alla corrosione

Quindi, con 0,20 mm di sovraspessore per ciascuna faccia considerata, si garantisce per la vita utile dell'opera, nessuna necessità di intervento manutentivo e/o di rinforzo per perdita di spessore da corrosione. Con approccio statistico sugli spessori di produzione delle lamiere, adottando una tolleranza di spessori di Classe "B" (attualmente cl. "A" essendo EXC3), otterremmo lo scopo (mediamente sono $[-0,3 + 1,9]/2 = + 0,8$ mm > + 0,20 mm).

Ovvero, da un altro punto di vista, potendo utilizzare lamiera Classe A, funzione dell'importanza dell'opera, ma adottando lamiera Classe B (obbligatoria per opere EXC4), per una lamiera p. es. sp. 40 mm avremo un sovrametallo medio statistico differenziale tra A e B pari a $[(-0,3 + 1,9) / 2] - [(-0,8 + 1,4) / 2] = 0,8 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm} = + 0,5 \text{ mm} > + 0,2 \text{ mm}$, per cui il solo passaggio da classe A a B garantirebbe un sovrametallo per la vita utile dell'opera.

Questo, tuttavia, in condizioni ideali per la corretta passivazione dell'acciaio autoprotetto, ma gli ambienti reali frequentemente sono più severi di quelli ideali sperimentali.

A tal proposito, prendendo a riferimento la norma UNI EN 10025-5 Allegato C, ".... la resistenza alla corrosione atmosferica dipende dalle condizioni atmosferiche di periodi secchi ed umidi successivi per la formazione dello strato auto protettivo di ossido del metallo base. La protezione accordata dipende dalle condizioni ambientali e dalle altre condizioni prevalenti nella sede della struttura.....".

"Si raccomanda una protezione superficiale convenzionale quando il tenore di particolari sostanze chimiche nell'aria è considerevole e tale protezione diventa assolutamente necessaria quando la struttura è a contatto con l'acqua per periodi prolungati, è perennemente esposta all'umidità o deve essere utilizzata in atmosfera marina."

..... "Le superfici delle strutture, che non sono esposte agli elementi, ma che potrebbero essere soggette alla formazione di condensa, dovrebbero essere ventilate in modo adeguato".

Se l'ambiente è estremamente aggressivo, la soluzione sarebbe l'acciaio al carbonio verniciato con cicli severi, da rinnovare a cadenze stabilite, zincato a caldo o, nei casi più severi zincato a caldo e verniciato (sistema duplex). Da escludere in ogni caso l'acciaio autopatinabile verniciato, in quanto la verniciatura, barriera per l'ossigeno e l'umidità, di fatto non consente la formazione della patina passivante. Per cui la capacità ed il grado di protezione farebbe affidamento solo sulla verniciatura. Se si intende adottare comunque un rivestimento protettivo si può ricorrere, in alternativa, ad un acciaio al carbonio di tipo "tradizionale" sottoposto a zincatura a caldo o a verniciatura.

Per tutti gli altri casi, con ambienti mediamente aggressivi, l'acciaio autopatinabile assolve bene la sua funzione in termini di protezione. Per essere certi della durabilità si ritiene ragionevole l'adozione di sovraspersori. Situazione differente, invece, è quella legata all'eventuale verniciatura di strutture in acciaio autopatinabile, già in esercizio, che per esigenze di manutenzione e per contrastare gli effetti dell'esposizione di tale acciaio ad ambienti particolarmente aggressivi che nel tempo si siano rivelati non del tutto idonei ad esso e perciò debbano essere ulteriormente protetti.

In tali casi, per prolungare la vita delle strutture si può senz'altro ricorrere all'applicazione di cicli di verniciatura sostanzialmente simili a quelli previsti per gli acciai strutturali tradizionali. Peraltro, riguardo alle modalità di preparazione superficiale e di pitturazione, l'acciaio tipo autopatinabile è del tutto assimilabile agli altri tipi di acciaio: una volta preparate adeguatamente tutte le zone critiche degli elementi da pitturare (arrotondamento degli spigoli, eliminazione degli spruzzi di saldatura, molatura di asperità superficiali, ossidi ed impurità superficiali ecc.) i risultati migliori si ottengono con un buon sgrassaggio con solvente delle zone contaminate da olio e grasso, seguito da una accurata sabbiatura delle superfici e le modalità applicative dei prodotti dipenderanno, come sempre, dal tipo di Primer e dai tipi di pitture che compongono il ciclo prescelto.

È essenziale prevedere una completa rimozione della patina di ossidi. Occorre considerare che la verniciatura di questi acciai comporta, in genere, un consumo maggiore di vernici.

Per la programmazione della manutenzione occorre considerare che l'acciaio patinabile si corrode a velocità non sempre agevolmente prevedibili. Durante un'ispezione visiva alle strutture può essere arduo stabilire, se non in casi in cui il danno è già manifesto, quale parte della superficie sia effettivamente patinata, rispetto alle parti soggette localmente alla corrosione, perché i prodotti che si sviluppano in entrambi i casi sono molto simili, praticamente indistinguibili.

Questo comportamento, incidendo sulla dimensione delle sezioni resistenti, rende particolarmente necessario stabilire piani di manutenzione affidabili, soprattutto per strutture soggette alla fatica per cui possono essere particolarmente critiche le zone interessate dalle saldature e gli eventuali inneschi alla corrosione determinati dalle cause summenzionate.

Un buon piano di manutenzione deve prevedere una frequenza almeno quinquennale a meno che non si verifichino le condizioni per l'intensificazione dei controlli, che sono:

- ambiente costiero-marino. Data l'elevata concentrazione di cloruri e l'azione degli agenti atmosferici ci si possono avere corrosione localizzata, tipo pitting o caverne, e corrosione generalizzata accelerata;

- ambienti industriali o moderatamente inquinati. Se gli agenti chimici inquinanti sono abbondanti, come avviene nelle zone industriali, nelle aree urbane ed in tutte le applicazioni che presuppongono un traffico veicolare intenso, occorre prestare particolare attenzione all'uso di acciaio patinabile: la deposizione di specie carboniose, il mix di NO_x e SO₂, assieme alla concentrazione di sali, corrodono l'acciaio ad una velocità via via approssimabile all'acciaio non protetto.
- contatto con la vegetazione. La vegetazione ed il materiale organico, in particolare, nelle aree che sono prossime al suolo a contatto con l'acciaio patinabile, determina una condizione di costante alta umidità che non permette la formazione e la stabilità della patina, con conseguente grave corrosione localizzata.
- Alta umidità atmosferica /nebbia. L'acciaio patinabile soffre di corrosione accelerata se si verificano frequentemente e prevalentemente condizioni di elevata umidità atmosferica o nebbia.

6.2.4 Zincatura

Aspetti tecnici, durabilità ottenibile, predisposizioni necessarie, giunti ad attrito, ispezioni, metallizzazione.

La zincatura a caldo, per la sua capacità intrinseca di lunga durata senza richiedere manutenzione, è largamente utilizzata per la protezione dell'acciaio di tipo strutturale. In Italia solo recentemente si comincia ad utilizzarla anche per i ponti in acciaio mentre in altri Paesi, come USA e Giappone, viene impiegata già da decenni. In particolare, in Giappone dal 1960 sono stati messi in opera circa 1.000 ponti in acciaio zincato a caldo, sia stradali che ferroviari, senza che sia stata necessaria alcuna manutenzione o che siano emersi altri problemi ad essa riconducibile. Pur senza reale supporto scientifico, in passato si temeva che la zincatura a caldo potesse interferire con le caratteristiche dell'acciaio e le sue prestazioni nel tempo; oggi sia per studi specifici che per l'esperienza derivante dall'utilizzo di tale trattamento in una vasta casistica in ambito internazionale, si può considerare che l'uso della zincatura a caldo consente una progettazione sicura dei ponti secondo le indicazioni dell'Eurocodice 3.

Dal punto di vista delle dimensioni del materiale zincabile, numerosi impianti di zincatura hanno incrementato la loro capacità con bagni ed apparecchiature di sollevamento in grado di trattare componenti di acciaio di grandi ingombri e pesi.



Figura 6.9 – Esempio di ponte in acciaio zincato che dopo più di 20 anni dalla realizzazione presenta uno strato protettivo di spessore > 300 µm



Figura 6.10 - Esempio di ponte in acciaio zincato che dopo 27 anni dalla realizzazione presenta uno strato protettivo di spessore compreso tra i 150 µm e i 500 µm

Anche in Italia ci sono esempi di ponti realizzati in acciaio zincato per il traffico autostradale (ad esempio su A22 Autostrada del Brennero il Ponte Vaderna nei pressi di Bolzano) o il nuovo ponte sul fiume Po SS9 “Emilia” (Piacenza) di committenza ANAS, zintcati a caldo e verniciati.





Figura 6.12 - Nuovo ponte sul fiume Po SS9 "Emilia" (Piacenza) di committenza ANAS, zincato a caldo e verniciato



Figura 6.13 - USA - Buffalo Creek Bridge: ponte di 60 m circa con strutture di acciaio di implacato zincato a caldo e uso del tondino zincato nei componenti di cemento armato

La zincatura a caldo può essere utilizzata anche per la protezione delle armature di acciaio negli elementi di sostegno in cemento armato per un incremento sensibile della loro durabilità.



Figura 6.14 - Port Elisabeth (Sud Africa) – Armature zincate a caldo dopo oltre 40 anni di servizio (1964-2005). Ponte pedonale a pochi metri dal mare abbattuto per cessata utilità. Questa particolare circostanza ha consentito di verificare che le armature zincate erano ancora in perfetto stato

Nel caso di impalcati realizzati con trave reticolare con profili tubolari, essa può essere saldata o imbullonata attraverso l'adozione di giunti flangiati. Quest'ultima soluzione è ottimale per l'esecuzione della zincatura a caldo secondo la UNI EN ISO 1461 [12] allo scopo di assicurare la continuità e l'integrità del rivestimento di zincatura e l'efficacia della protezione di tutte le superfici, anche quelle interne non ispezionabili. Nel caso delle saldature i lembi da saldare devono essere protetti successivamente, in modo tale da ripristinare la protezione. Non può essere utilizzata la zincatura a caldo per la soluzione prospettata con travi a cassone chiuso per questioni dimensionali. Tuttavia, parti o sezioni di dimensioni adatte possono essere protette con la zincatura a caldo.

Aspetti tecnici

Lo zinco fuso a 450°C circa è in grado di formare sulla superficie dell'acciaio una lega zinco-ferro che, per semplice immersione dei manufatti metallici, produce un rivestimento metallico continuo e tenacemente ancorato e garantisce protezione in due modi complementari:

- effetto barriera, determinato dalla frapposizione di un rivestimento continuo ed impermeabile di leghe di zinco e ferro che isolano la superficie dell'acciaio dall'azione dell'ossigeno e delle specie ossidanti;
- protezione catodica, consistente in un fenomeno elettrochimico che impedisce che il ferro possa ossidarsi (cioè perdere elettroni). Nel caso il rivestimento di zinco venga scalfito, la differenza di potenziale tra i due metalli sovrapposti preserva la struttura di acciaio a spese dello zinco che si sacrifica.

L'aderenza è garantita dalla natura del rivestimento ottenuto come effetto della diffusione dello zinco negli strati superficiali dell'acciaio. Ciò rende superfluo la specifica di test per la valutazione dell'aderenza come stabilito dalla norma UNI EN ISO 1461 [12] "Rivestimenti di zincatura per immersione a caldo su prodotti finiti ferrosi e articoli di acciaio - Specificazioni e metodi di prova".

Per le caratteristiche del rivestimento, che consiste in una lega superficiale tra lo zinco ed il ferro degli strati più esterni dell'acciaio, per la zincatura a caldo sussiste l'impossibilità dello sviluppo di corrosione sottopelle, di diffusione di specie aggressive nel rivestimento e distacco.

Ciò fa sì che, anche laddove si dovesse, dopo svariati decenni di esercizio, ricorrere a misure di ripristino della protezione, gli interventi sono resi più agevoli dal fatto che lo zinco diffuso nelle leghe più interne conserva un'ottima capacità protettiva residua su cui effettuare la verniciatura.

Per la zincatura a caldo il progettista dovrà prevedere richiedendola allo zincatore, all'atto dell'ordine, una dichiarazione di conformità alla norma UNI EN ISO 1461 [12]. Ciò garantisce, che siano rispettate le condizioni tecniche di fornitura per una zincatura a caldo a regola d'arte, priva di difetti e adeguato spessore (secondo la tabella presente nella stessa normativa). A causa degli elevati spessori dell'acciaio dei componenti strutturali dei ponti, il rivestimento di zincatura risultante su di essi può raggiungere elevati spessori (400 µm ed oltre).

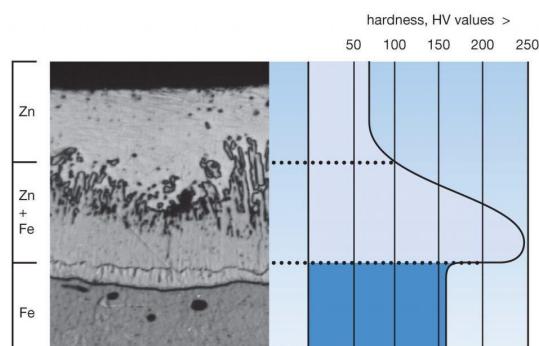


Figura 6.15 - Sviluppo del rivestimento di zincatura: micrografia e durezza superficiale in HV

Durabilità

Per una indicazione delle durate in servizio della zincatura a caldo si consiglia di consultare le tabelle disponibili nella norma UNI EN ISO 14713-1:2017 [9], che fornisce indicazioni sulla riduzione media annuale dello spessore di rivestimento, previa individuazione della classe di corrosività dell'ambiente.

In ogni caso, occorre considerare che le stime di durabilità desumibili dalla predetta norma sono molto prudenziiali. I dati, infatti, si riferiscono al primo anno di esposizione in cui la patina di passivazione si forma e si stabilizza garantendo prestazioni molto migliori negli anni successivi. La norma UNI EN ISO 9224 [20] fornisce informazioni più accurate per esposizioni di lunga durata.

Ad ogni modo, la norma, fornisce previsioni di durata effettuate sulla base di dati di composizione dell'aria rilevati tra il 1990 ed il 1995, quando i valori di concentrazione di SO₂ erano sensibilmente più elevati di quelli attuali.

Comunque, già nel 1994 i controlli della composizione dell'aria fornivano risultati medi in Europa per atmosfere urbane con concentrazioni di SO₂ tali da determinare una perdita di spessore di zinco di 1.5 ÷ 2 µm/anno. Un'indagine eseguita in Gran Bretagna fino al 2000, ha dimostrato che le normative ambientali hanno comportato un notevole miglioramento rispetto ai dati precedenti con una riduzione media di circa il 60% della velocità di corrosione dello zinco rispetto a primi anni '90. L'Università di Ancona (oggi Università Politecnica delle Marche – UNIPM) ha condotto uno studio nel 2001 su piloni di bassa tensione in opera da circa 30 anni, ed i ricercatori hanno rilevato spessori residui dello strato di zincatura ancora in linea con gli odierni capitolati di appalto per la costruzione in acciaio e gli stessi requisiti normativi. Ciò è stato recentemente confermato (2018) da una ricerca condotta dalla stessa Università Politecnica delle Marche, che ha analizzato il comportamento di campioni di acciaio zincato in diversi ambienti sul territorio italiano, riscontrando velocità di corrosione notevolmente ridotte rispetto alle medie europee, molto al di sotto del micrometro per anno di rivestimento in quasi tutti gli ambienti di esposizione.

SITES OF EXPOSURE WTH RELATIVE CORROSION RATE VALUES, CALCULATED AS TWO DIFFERENT WAY

Italy Macro-area	City	Province	Micro-climate	Corrosion rate from slope of straight line g m ⁻² y ⁻¹	Corrosion rate as average of partial values g m ⁻² y ⁻¹
North	Solero	Alessandria (AL)	rural	1.59	1.51
	Torino	Torino (TO)	urban	1.23	1.14
	Castel Franco Ven.	Treviso TV)	rural	1.67	1.58
	S. Vito al Tagliamen.	Pordenone (PN)	industrial	2.44	2.47
	Trezzano Rose	Milano (MI)	rural/urban	1.55	1.45
Center	Reggio Emilia	Reggio Emilia (RE)	rural/urban	1.47	1.27
	Cesena	Forlì-Cesena (FC)	Industrial	3.52	3.53
	Ancona	Ancona (AN)	marine	3.24	3.35
South	Lacedonia	Avellino (AV)	industrial	2.86	2.99
	Galatina	Lecce (LE)	industrial	2.45	2.44
	Carini	Palermo (PA)	marine	2.28	2.44

RANKING OF ATMOSPHERIC CORROSIVITY OF THE MONITORED CORROSION SITES

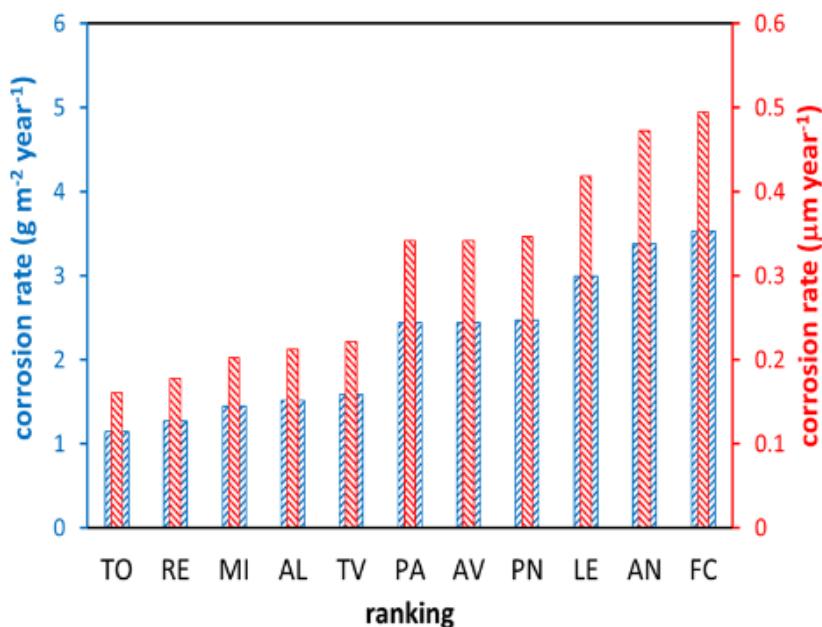


Figura 6.16 - Tabella e quadro riassuntivo dei risultati ottenuti da UNIPM in vari ambienti di esposizioni tipici in Italia (fonte proceedings di Intergalva 2018).

Accettando precauzionalmente le durate di figura 6.16 le proprietà del rivestimento di zincatura assicurano una protezione di lunga durata, per esempio, in area costiera urbana un rivestimento di zinco di 100 μm svolge la sua azione all'incirca per 50 anni con al massimo un consumo di $2 \mu\text{m}/\text{anno}$ ben più a lungo di qualsiasi rivestimento protettivo alternativo.

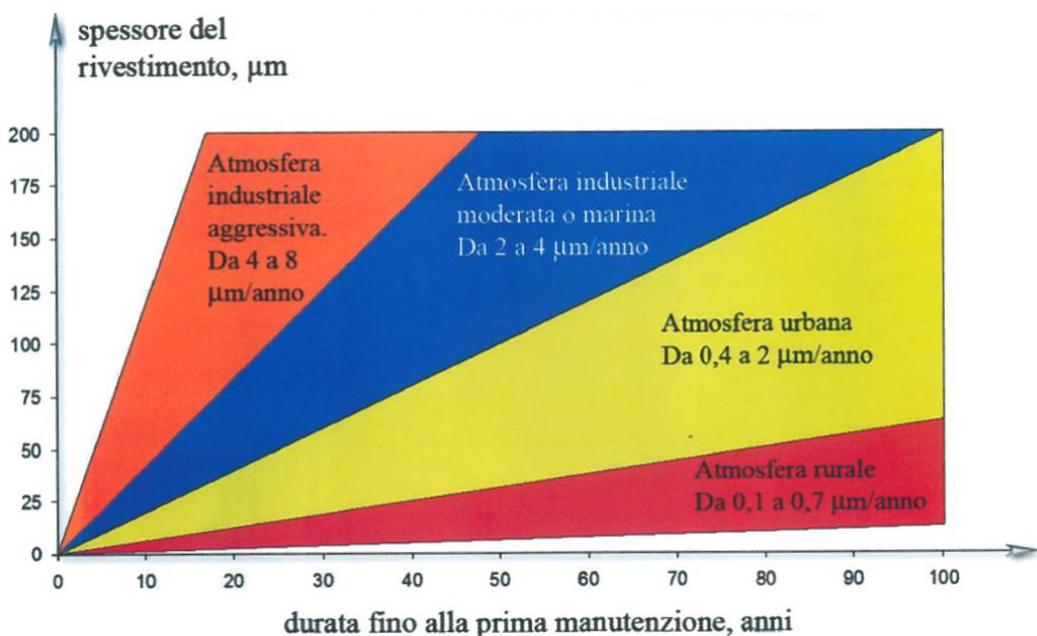


Figura 6.17 - Riduzione media annuale dello spessore di rivestimento di zinco in funzione della corrosività dell'ambiente [35]

Si consideri, però, che nella pratica corrente si verifica sempre, o quasi, che gli spessori applicati siano superiori ai requisiti, ciò determina una protezione che supera i 60-100 anni in quasi tutti gli ambienti.

Il principale fattore che determina l'affidabilità della protezione offerta dalla zincatura a caldo è costituito dallo spessore del rivestimento. Il maggiore o minore sviluppo della reazione metallurgica di formazione dello strato, porta a rivestimenti più o meno spessi. Lo spessore di zincatura è determinato, di conseguenza, dal tempo di permanenza, o di immersione, del manufatto in vasca e dalla velocità con cui tale reazione avviene. Poiché per spessori di acciaio maggiori occorre un tempo di immersione più lungo per portare l'acciaio alla temperatura del bagno di zincatura, la zincatura risultante, sarà più spessa per profili di acciaio di spessore maggiore. Ecco perché la norma UNI EN ISO 1461 [12] specifica i requisiti minimi di spessore per la fornitura in funzione dello spessore dell'acciaio.

La norma UNI EN ISO 14713-2 [9] dà informazioni utili per individuare l'acciaio delle migliori caratteristiche per la zincatura a caldo, basate sui contenuti di Silicio e Fosforo, considerando che il loro contenuto influenza anche l'aspetto estetico finale della zincatura (aree più scure) e le caratteristiche di resistenza meccanica del rivestimento.

È consigliabile una certa cautela per evitare danneggiamenti per urti agli spigoli, che per spessori così elevati possono comportare rischio di danneggiamenti locali. Si noti che la durabilità con tali spessori diviene notevole in tutti gli ambienti corrosivi.

Predisposizione alla zincatura a caldo

Per il corretto sviluppo del rivestimento occorre, ovviamente, che lo zinco durante l'immersione possa bagnare tutte le superfici del manufatto con continuità ed in modo omogeneo. Esso deve scorrere liberamente su tutte le superfici per l'intera loro estensione, sia all'esterno che all'interno, e deve drenare altrettanto facilmente. Ciò determina l'importante caratteristica della zincatura a caldo che consiste nella protezione delle superfici interne dei manufatti cavi, che non si può ottenere con altri trattamenti alternativi e l'affidabilità caratteristica della protezione anche nei casi di superfici di difficile o impossibile accessibilità.

Nella maggior parte dei casi una zincatura di qualità è subordinata alla realizzazione di fori per consentire sia il deflusso dello zinco e delle altre soluzioni di processo che lo sfialto dell'aria.



Figura 6.18 - La presenza del cordone di saldatura rende insufficiente la sezione del foro di drenaggio [35]

Per le geometrie diverse che possono avere i manufatti, tali fori possono essere necessari nella maggior parte dei casi non solo in presenza di cavità ed interstizi ma anche quando le condizioni di immersione ne determinano la necessità (per esempio quando una parte concava verso l'alto tende ad accumulare le fasi liquide o quando una concavità rivolta verso il basso cattura l'aria e non consente allo zinco di bagnare completamente la superficie). La precisa realizzazione delle forature richiede una conoscenza di base, semplicemente deducibile dalla lettura della norma UNI EN ISO 14713-2 [10]. Tuttavia, in presenza di dubbi, è sempre consigliabile richiedere il supporto dello zincatore il quale sarà in grado di fornire delle indicazioni pratiche per la fase di progetto e di esecuzione dell'opera.

Nota: L'assenza della foratura o una sua non corretta realizzazione, nel caso di intrappolamento delle soluzioni acquose di processo all'interno di manufatti cavi può provocare esplosioni gravissime che possono costituire un rischio per la sicurezza degli operatori oltre che un danno alla vasca di immersione



Figura 6.19 - Esempio di esplosione durante l'immersione dell'elemento nel bagno di zinco fuso a causa di un'intercapedine non forata [35]

In genere, le zincherie sono attrezzate a ricevere manufatti di dimensioni notevoli, e spesso di peso maggiore rispetto alle portate possibili in impianti che offrono trattamenti alternativi. È bene, però, informarsi su ampiezza e dimensione dei bagni e portata delle attrezzature di sollevamento, se si pensa di zincare elementi di ingombro e peso inusuali. È sempre possibile e consigliabile (non solo per la zincatura, ma anche per tutte le fasi di trasporto e movimentazione del manufatto) ricorrere alla progettazione di parti separate da assemblare successivamente, senza che ci sia alcuna limitazione sul risultato finale dell'opera. I manufatti da zincare devono essere sempre provvisti di punti di aggancio per il loro sicuro sollevamento e movimentazione. Essi devono essere facilmente traslati, immersi ed estratti dalle soluzioni di pretrattamento e dalla vasca di zincatura; deve essere possibile applicare le velocità e le angolature migliori rispetto al pelo del bagno di zincatura.

Particolare attenzione sarà posta sui pezzi soggetti a future lavorazioni di saldatura dopo la zincatura. Se proprio corre la necessità di saldare pezzi zincati e non possono essere utilizzati tipi di collegamento che preservino lo strato di zinco come la bullonatura, occorre proteggere preventivamente i lembi sottoposti alla saldatura per qualche centimetro, in modo che su di essi non avvenga la zincatura (per esempio attraverso protezione con vernici adatte), oppure rimuovere da essi il rivestimento di zincatura prima di procedere alla saldatura. In questo modo la saldatura non verrà influenzata dalla presenza dello zinco. La protezione delle parti saldate potrà successivamente essere ripristinata mediante metallizzazione, vernici ricche di zinco o processi simili.

Il progresso tecnico e l'adeguamento progressivo dell'industria di zincatura a caldo alle esigenze di trattamento di manufatti di dimensioni considerevoli, ha portato all'adozione di vasche di zincatura e sistemi di sollevamento adatti. Dimensioni massime rappresentative per le vasche, possono essere fornite sulla base della generale praticabilità della zincatura a caldo, tenendo conto delle caratteristiche degli impianti e della loro distribuzione sul territorio nazionale.

Un riferimento utile per le dimensioni massime zincabili, per un singolo manufatto, da un numero adeguato di impianti di zincatura sufficientemente distribuiti sul territorio nazionale è:

lunghezza 13 m, altezza * 2,40 m, larghezza* 1,40 m, peso complessivo 8 ton.

È importante sottolineare che le dimensioni delle vasche devono essere maggiori dei pezzi a zincare.

Sono disponibili, anche se in numero limitato e solo in alcune zone d'Italia, impianti di maggiore capienza, fino ad un massimo delle dimensioni di vasca di:

lunghezza 16,50 m, profondità 3,40 m, larghezza 2,80 m.

Nota: *Altezza e larghezza sono da intendersi rispetto alla direzione di immersione nelle vasche di zincatura.

Come citato in precedenza, è fondamentale considerare che a tali dimensioni di vasca non corrispondono pari dimensioni di manufatto zincabile. Infatti, la zincabilità è funzione di una serie di fattori tra cui i principali (non unici) sono:

- le tre dimensioni nel loro insieme;
- la forma e simmetria del manufatto e la distribuzione del peso;
- l'inclinazione necessaria all'immersione ed all'estrazione nelle vasche di zinco fuso;
- le predisposizioni di drenaggio e scarico;
- il posizionamento dei punti di aggancio;
- le tolleranze dimensionali di sicurezza per evitare il contatto ed il danneggiamento della vasca di zincatura;

Di conseguenza, per la valutazione di zincabilità per manufatti eccedenti le dimensioni precedentemente indicate, è opportuno consultare esperti del settore, per ottenere informazioni circa la zincabilità del pezzo da trattare. L'Associazione di categoria fornisce questo tipo di informazioni a titolo gratuito.

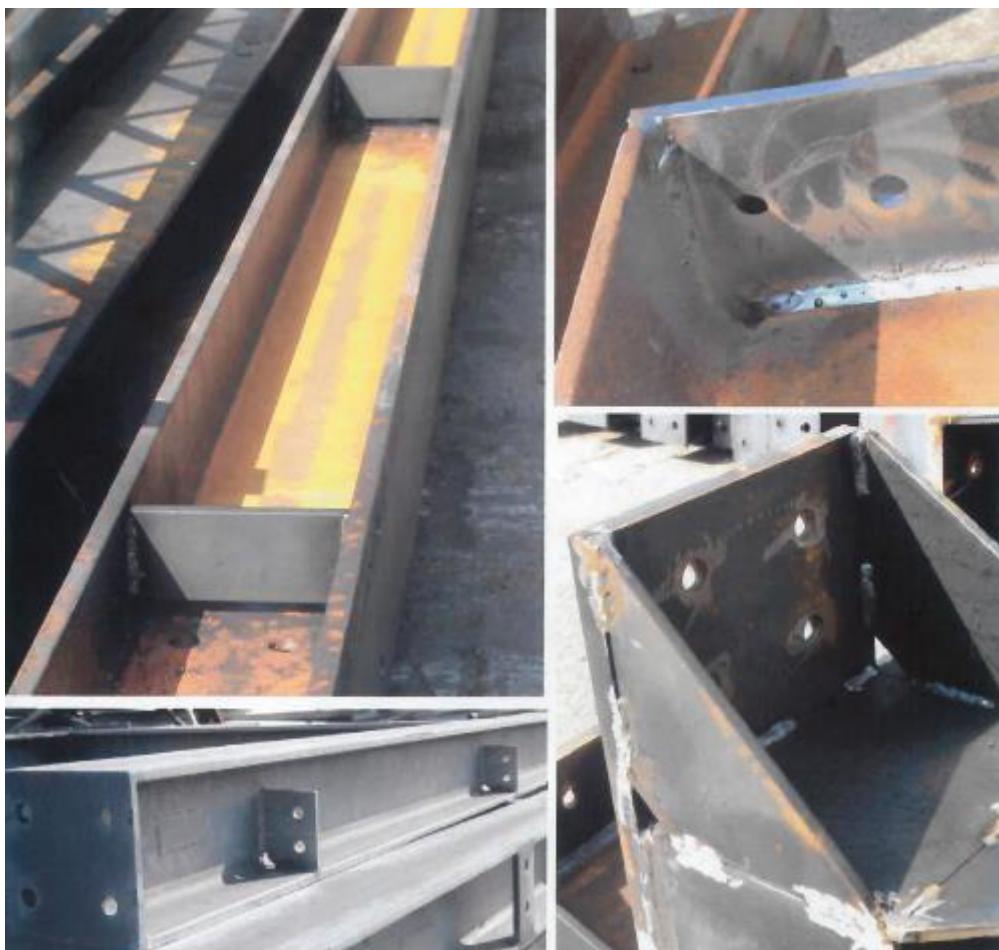


Figura 6.20 - Forature e predisposizioni corrette

Bullonatura e giunti ad attrito

È bene che il progettista ed il realizzatore pongano particolare attenzione alla realizzazione di manufatti che non creino problemi in fase di assemblaggio perché lavorazioni meccaniche o saldature post zincatura comporterebbero la rimozione locale e il danneggiamento della protezione.

La tecnica da preferire per l'assemblaggio è la bullonatura con bullone zincato a caldo, che non danneggia il rivestimento. Occorre che i bulloni siano protetti dalla corrosione al pari del manufatto di acciaio zincato che assemblano. I bulloni assieme ad altre minuterie vengono zincati in cestelli e sottoposti a centrifugazione appena dopo l'estrazione del bagno di zinco, per allontanare eccessi di materiale dai filetti che altrimenti determinerebbero l'impossibilità di accoppiamento vite-dado.

La norma di riferimento per la bulloneria zincata a caldo è la UNI EN ISO 10684 [13] - Elementi di collegamento - Rivestimenti di zinco per immersione a caldo. La norma specifica il processo, i materiali e i requisiti dimensionali di bulloni e fornisce alcuni criteri prestazionali per la zincatura a caldo di questi componenti, mentre i limiti dimensionali sono specificati nella normativa ISO 965 [14] ed i requisiti per i marchi sono nella ISO 898-1÷2 [17]. Bulloni ed elementi filettati possono essere anche zincati secondo la tabella 4 della normativa UNI EN ISO 1461 [12] prevedendo tolleranze opportune specifiche per l'accoppiamento dado-vite per i bulloni.

In alternativa si possono utilizzare anche bulloni di acciaio inox ma è bene fare una verifica di compatibilità tra il tipo di acciaio utilizzato e lo zinco o prevedere un opportuno isolamento per evitare fenomeni galvanici. Anche componenti di giunti ad attrito possono essere zincati a caldo con qualche precauzione. Per la progettazione del giunto possono considerarsi validi i fattori di attrito presenti in tabella 17 della norma UNI EN 1090-2 [25].

Interventi di ripristino per danneggiamenti localizzati

La riparazione della zincatura può avvenire tramite vernici ricche di zinco spalmate nei punti in cui vi è il difetto attraverso pennello oppure a spruzzo o tramite metallizzazione.

Le vernici possono essere formulazioni liquide mono o bi-componenti in cui la polvere di zinco viene dispersa in una matrice organica, oppure sono prodotti a base di etilsilicati (zincante inorganico).

Questi prodotti possono essere adatti al ripristino di una certa dimensione anche estesa ed offrono buone performance anticorrosive e sono particolarmente adatti ai grossi interventi di riparazione che non lascino molto spazio a considerazioni di tipo estetico, anche se l'impatto visivo è destinato a sfumarsi nel tempo.

Un'alternativa per piccoli ripristini è costituita dagli spray a base di polvere di zinco micronizzato o una miscela di polveri di zinco ed alluminio disperso in opportuna resina legante. Questi prodotti sono venduti solitamente in bombolette con una purezza superiore al 98% in metallo. Asciugano in 90 secondi e con due mani leggere si ottengono ottime protezioni prevenendo ruggine ed ossidazione.

Questi due tipi di trattamenti riparatori non richiedono una preparazione impegnativa per la loro applicazione, ma la superficie da ricoprire non deve essere contaminata da olio, grasso, condensa e prodotti di corrosione per cui deve essere sgrassata o spazzolata prima dell'applicazione su manufatti in opera.

La norma UNI EN ISO 1461:2009 [12] stabilisce che lo spessore minimo debba essere 100 µm, ovvero uguale allo spessore della zincatura e con materiale compatibile alla vernice, qualora l'articolo debba essere sottoposto a verniciatura dopo la zincatura.

Metallizzazione

La metallizzazione o spruzzatura termica è un processo in base al quale si riscalda lo zinco fino a ridurlo allo stato liquido e lo si proietta sulla superficie di acciaio da proteggere attraverso opportune pistole che possono essere caricate con polvere o filo di zinco.

Nonostante il fatto che lo zinco venga riscaldato fino a liquefazione, la metallizzazione non è considerata un processo a caldo, perché non vi è, se non molto limitatamente, una reazione con la superficie del substrato, ma le minuscole gocce di zinco fanno presa sulla superficie per effetto della rugosità superficiale alla quale restano fissate sostanzialmente per aggrappaggio meccanico. Di conseguenza, la metallizzazione deve essere effettuata con superfici esenti da residui di qualsiasi genere, asciutta e senza tracce di ossidazione. Per questo la metallizzazione deve essere effettuata immediatamente dopo la sabbiatura, o altra pulizia adatta. Per la metallizzazione, oltre allo zinco di purezza 99,99% si può utilizzare anche zinco-alluminio in accordo con la EN ISO 14919:2015 [18].

In conclusione, la metallizzazione pur non riuscendo ad eguagliare le durate della zincatura a caldo, ha performance comparabili ed è il sistema più efficace per la riparazione sia di difetti dell'ordine del centimetro quadrato che per aree molto estese. Può essere effettuata in loco anche su manufatti già installati, ma comporta l'utilizzo di apparecchiature particolari, con conseguente ricaduta su reperibilità e sui costi.

La norma che stabilisce le condizioni tecniche di fornitura della metallizzazione è la UNI EN ISO 2063:2017 [19].

6.2.5 Verniciatura

Aspetti tecnici, durabilità ottenibile, predisposizioni necessarie, giunti ad attrito, realizzabilità in cantiere, manutenzione ordinaria, verniciatura a liquido, verniciatura a polvere

I trattamenti di protezione superficiale hanno il compito di impedire il contatto del metallo con l'ambiente, che può innescare processi di corrosione e sono solitamente attuati a seguito di trattamenti di preparazione superficiale.

La semplice verniciatura crea uno strato impermeabile che evita il contatto della superficie metallica con l'ambiente corrosivo. Tale tipologia è detta protezione passiva e consiste nell'applicazione di rivestimenti sulla superficie del metallo, costituiti da pitture, vernici. È importante sottolineare che basta qualche difetto perché si generino falle consistenti nella funzione di barriera perciò è molto importante provvedere a tutti gli accorgimenti necessari per la esecuzione di una corretta verniciatura.

Le vernici protettive possono essere classificate secondo le modalità di essicazione dei film superficiale o secondo la funzione tipica.

Aspetti tecnici

La funzionalità della protezione mediante verniciatura è garantita solo in presenza di un manufatto realizzato e rifinito in modo corretto, evitando trappole di corrosività in fase costruttiva e effettuando la preparazione meccanica necessaria per affrontare l'ambiente di installazione finale.

La qualità effettiva della protezione dipende da:

- qualità del trattamento di preparazione superficiale;
- tipologia e qualità delle vernici protettive;
- efficacia dell'attivatore di aderenza;
- conformità del processo di verniciatura alle specifiche del produttore della vernice deposte, dall'aderenza;
- capacità di isolamento della superficie dell'acciaio sia dal punto di vista delle correnti elettriche superficiali (rigidità dielettrica) che dal punto di vista della resistenza alla diffusione delle specie chimiche aggressive nello spessore polimerico.

Essendo molto differenti tra loro i sistemi di protezione ottenibili con le differenti vernici, il progettista onde scegliere il processo o il ciclo idoneo, deve avere accesso alla documentazione tecnica e ottenere dall'applicatore una dichiarazione, che confermi l'idoneità o la durabilità del sistema protettivo in una determinata classe di corrosività. Per assicurare le prestazioni ottimali del sistema, se possibile, esso deve essere applicato in officina in modo da garantire miglior controllo dell'applicazione, della temperatura, dell'umidità relativa, migliore facilità di riparazione del danno, rendimento maggiore, miglior controllo dei rifiuti e dell'inquinamento.

La seguente tabella riassume le caratteristiche principali delle vernici liquide ed a polvere.

CARATTERISTICA	LIQUIDO	POLVERE
Tipi di materiale verniciabile	Acciaio grezzo, acciaio zincato	Acciaio grezzo, acciaio zincato
Tipo di applicazione	Manuale	Automatica su impianto
Realizzabilità in officina	Sì	Sì, impianti dedicati
Realizzabilità in cantiere	Sì	No
Prestazioni protettive	Buone	Buone
Spessore medio film per classe C3H	160 m	80 m
Spessore medio film per classe C5H	240-360 m	160 m
Uniformità dello spessore film	Sufficiente	Ottima
Ripetibilità del processo	Limitata	Totale
Tenuta ai raggi UV	A seconda delle vernici impiegate	A seconda delle vernici impiegate
Resistenza a graffi e urti	Scarsa	Buona
Tempi realizzativi	Medio lunghi in funzione delle condizioni ambientali	Brevi
Dimensioni massime pezzo verniciabile	Nessun limite	In funzione dell'impianto disponibile (mediamente 13x2,5x1,6m)
Peso massimo pezzo verniciabile	Nessun limite	In funzione dell'impianto disponibile (mediamente 2.000 kg)

Tabella 6.15 - Caratteristiche verniciatura a liquido e in polvere

Durabilità ottenibile

La durabilità, cioè il periodo temporale di efficacia, da richiedere al sistema anticorrosivo, deve essere proporzionato alla vita utile del ponte in modo da limitare i costi manutentivi diretti e indiretti, quali la mancata disponibilità degli spazi, i disagi tecnici e sociali durante le manutenzioni.

La prestazione di durabilità della protezione anticorrosiva realizzata mediante verniciatura è ben inquadrata dalle UNI EN ISO 12944 [30] che, per ogni classe di corrosività ambientale, determina tre gradi di durabilità raggiungibili:

- Bassa (L): da 2 a 5 anni
- Media (M): da 5 a 15 anni
- Alta (H): oltre i 15 anni

La durata di un sistema di verniciatura protettiva dipende da diversi fattori come il tipo di verniciatura, la progettazione della struttura, la condizione del supporto prima della preparazione, l'efficacia della preparazione della superficie, la qualità dell'applicazione, le condizioni ambientali durante l'applicazione, le condizioni di esposizione dopo l'applicazione. Per identificare il trattamento che offre la durabilità richiesta è necessario individuare i cicli idonei e sceglierne il più adatto. La norma UNI EN ISO 12944-5 [30] fornisce esempi di sistemi di verniciatura adatti per diversi ambienti.

Sistemi anticorrosivi con bassa durabilità richiederanno numerosi interventi di manutenzione nel corso della vita utile dell'infrastruttura, quelli con durabilità importanti potrebbero arrivare, specie in abbinamento con la zincatura a caldo, anche ad escluderli.

Predisposizioni necessarie

A seconda delle condizioni ambientali, del clima e della durabilità richiesta è necessario mettere a punto un determinato ciclo di verniciatura. Per ciclo di verniciatura si intende: la fase di preparazione superficiale, l'eventuale applicazione di primer, l'eventuale applicazione di mani intermedie e l'applicazione della mano a finire. Realizzare un'adeguata preparazione superficiale del manufatto e rispettare le condizioni e i tempi di applicazione sono regole fondamentali per ottenere i risultati dichiarati dalle schede tecniche delle vernici.

Il funzionamento dei cicli di verniciatura anticorrosiva può essere inficiato da una errata progettazione: come per la zincatura, vanno evitate le trappole di corrosione e previste le necessarie finiture meccaniche. La norma UNI EN 1090-2:2018 [25] prevede che per la verniciatura ci sia una preparazione superficiale (realizzata dal carpentiere) adeguata alla classe di corrosività di installazione, determinata secondo la UNI EN ISO 8501.

Realizzabilità in cantiere

È tuttavia preferibile che il ciclo di verniciatura sia portato a termine in officine specializzate prima del conferimento in cantiere: questo consente di avere condizioni di applicazione controllate e omogenee, facilità d'esecuzione, riduzione dei danni all'ambiente e di tutti i rischi per la salute e la sicurezza degli operatori.

Movimentare manufatti in acciaio già verniciati rappresenta un impegno superiore rispetto alla movimentazione di manufatti grezzi: il livello di professionalità dei montatori deve essere di primordine.

Ad ogni modo, anche se non auspicabile, è sempre possibile verniciare in cantiere.

Come da UNI EN ISO 12944 [30] è bene assicurarsi che siano ridotti al minimo i danni all'ambiente e tutti i rischi per la salute e la sicurezza. A tal fine è bene limitare le operazioni in aria libera e optare per verniciature realizzate in impianti dotati di tutte le prescrizioni di sicurezza e tutela dell'ambiente. Nella pratica gli elementi in acciaio sono spesso trasportati in cantiere con un rivestimento superficiale di fondo definito "antiruggine" o "primer". Una volta che gli elementi sono montati, è necessario ritoccare le parti di rivestimento che si siano deteriorate in fase di assemblaggio. Solo dopo i ripristini è possibile procedere con le mani di verniciature successive.

Giunti ad attrito

I giunti ad attrito dovranno essere accuratamente protetti non appena completato il serraggio definitivo, verniciando a saturazione i bordi dei pezzi a contatto, le rosette, le teste ed i dadi dei bulloni, in modo da impedire qualsiasi infiltrazione all'interno del giunto.

A piè d'opera, e prima ancora di iniziare il montaggio, si dovranno ripristinare tutte le verniciature eventualmente danneggiate dalle operazioni di trasporto; infine, qualora la posizione di alcuni pezzi desse luogo, a montaggio ultimato, al determinarsi di fessure o spazi di difficile accesso per le operazioni di verniciature e manutenzione, tali fessure o spazi dovranno essere, prima dell'applicazione delle mani di finitura, accuratamente chiusi con materiali sigillanti.

I controlli previsti durante l'applicazione del ciclo di verniciatura consistono in:

- Accertamento visivo dell'assenza di colatura, festonature, bolle, raggrinzimenti, macchie;
- Controllo dello spessore delle singole mani e totali secondo UNI EN ISO 2808 [28].
- Controllo dell'aderenza effettuato mediante quadrettatura secondo UNI ISO 2409 [32] o mediante strappo secondo UNI EN 4624 [31].

Per la progettazione del giunto possono considerarsi validi, come già indicato per la zincatura, i fattori di attrito presenti nella norma UNI EN 1090-2 [25].

Manutenzione ordinaria

Le vernici necessitano di regolare manutenzione e pulizia per assicurare la continuità delle proprietà decorative e protettive della superficie.

La frequenza degli interventi di pulizia dipende da molti fattori, fra cui:

- collocazione geografica della costruzione;
- classe di corrosività ambientale in cui è inserita la costruzione (per esempio: marina, industriale, residenziale, rurale, ecc.);
- livello di emissioni inquinanti nell'aria;
- presenza di venti con intensità notevoli (es. Bora di Trieste);
- possibilità di pulviscoli trasportati dal vento (es. sabbia, polvere, ecc.);
- ipotesi di cambio nel tempo della classe di corrosività (es. passaggio da rurale a industriale)

Va definito una cadenza temporale di ispezioni da compiere per verificare lo stato di efficienza della protezione anticorrosiva e stabilirne o no la necessità di manutenzione.

Committente, progettista e realizzatore dovranno definire assieme dei punti di riferimento, preferibilmente i più critici, da tenere monitorati nel corso degli anni.

Verniciatura a liquido

La verniciatura a liquido rappresenta il metodo anticorrosivo storicamente più utilizzato per la "presunta" facilità applicativa e la sua grande versatilità in termini di disponibilità.

Tecnicamente la protezione anticorrosiva realizzata tramite verniciatura è ottenuta grazie dall'effetto barriera creato dal film depositato sulla superficie del manufatto metallico. A questo, dove richiesto, può essere unito un effetto catodico attraverso l'applicazione di un primo strato di primer a base di zinco.

I film di vernice a liquido presentano spessori sempre maggiori man mano che le condizioni ambientali diventano gravose. Con l'aumento di spessore aumenta la possibilità di facili scalfitture del film durante le movimentazioni: si raccomanda un'attenta verifica al termine dell'installazione.

La scelta del ciclo di verniciatura può essere definita a capitolato mediante:

- indicazioni di tipo prescrittivo, con esaustiva descrizione del ciclo;
- richieste di tipo prestazionale, con descrizione delle condizioni ambientali e della durabilità richiesta al ciclo.

La verniciatura a liquido necessita di manutenzione e pulizia ordinaria da programmare ad intervalli regolari a seconda delle condizioni ambientali: questo piano manutentivo va definito con il contributo del verniciatore e del produttore dei prodotti vernicianti.

Sulla base delle modalità di essicazione del film superficiale, è possibile distinguere tra pitture ad essicazione fisica, pitture essicanti ad aria e pitture ad indurimento chimico.

Verniciatura a polvere

Nell'ultimo decennio la tecnologia ha permesso di espandere il campo applicativo delle vernici a polvere dai piccoli oggetti ai grandi manufatti. Oggi è possibile sottoporre a verniciatura a polvere anche elementi di grandi dimensioni, lunghezze fino a 13 metri ad esempio, e di elevato peso, 2000 kg/pezzo.

Per esigenze di protezione dalla corrosione, attualmente, le verniciature a polveri sono consigliate per la realizzazione di sistemi duplex (verniciatura su zincatura a caldo), secondo UNI EN 13438 [11].

La verniciatura a polvere è realizzata su impianti industriali automatizzati.

L'adesione del film verniciante è assicurata dal trattamento di conversione superficiale, nei metodi più avanzati di natura nanotecnologica, che si effettua automaticamente dopo una prima fase di lavaggio.

L'applicazione della polvere verniciante avviene per via elettrostatica consentendo la creazione di un film dallo spessore regolare e omogeneo dall'elevato valore estetico.

La polimerizzazione della polvere verniciante avviene sempre in condizioni controllate portando il manufatto metallico a circa 180°C per circa 20 minuti. Una volta raffreddato il manufatto è pronto per essere spedito immediatamente in cantiere.

Per la definizione delle caratteristiche della protezione anticorrosiva e dei piani manutentivi ci si rifà direttamente alle indicazioni previste per la verniciatura a liquido: cambiano la tecnologia, spessori e tipologia di vernici utilizzate (UNI EN ISO 12944 [30]). Non vi è una norma specifica dedicata alla protezione anticorrosiva mediante vernice a polvere, ma si fa riferimento alla UNI EN ISO 12944 [30].

In merito all'utilizzo della norma citata per la vernice a polvere, va precisato che quest'ultima parla di "pitture e vernici" in senso generale e indica i cicli a liquido solo come esempi generici ma non esclusivi.

A dettare le condizioni sono i test da superare per affermare che il ciclo realizzato è conforme alle richieste per una determinata prestazione. Il miglior metodo di pulizia per le vernici a polvere avviene attraverso un regolare lavaggio della superficie utilizzando una soluzione di acqua calda e detergente delicato (pH 5-8).

Tutte le superfici vanno pulite utilizzando uno straccio soffice o una spugna, non usare nessuna spazzola se non di origine naturale.

La frequenza della pulizia degli elementi trattati con vernici a polvere dipende dall'aspetto che si desidera mantenere e dalla necessità di rimuovere depositi che potrebbero, a prolungato contatto, causare danni al rivestimento con conseguente riduzione della durabilità. In ambiente non particolarmente aggressivo (es. rurale o urbano), la normale frequenza di pulizia può essere di circa 12 mesi. In presenza di deposito di particolare sporco si raccomanda una maggiore frequenza di pulizia. Quando l'ambiente è aggressivo la frequenza di pulizia va ridotta a intervalli di 3 mesi. In presenza di elevato inquinamento atmosferico o in presenza di ambiente particolarmente corrosivo, il periodo fra gli interventi va ulteriormente ridotto.

TIPO DI AMBIENTE	PROGRAMMA DI MANUTENZIONE CONTROLLO E PULIZIA
Urbano-rurale	ogni 12 mesi
Industriale	ogni 6 mesi
Marino	ogni 3 mesi
Industriale e marino	ogni 3 mesi

Tabella 6.16 – Frequenza controllo e pulizia verniciatura a polvere

È assolutamente vietato utilizzare solventi o soluzioni che contengano:

- idrocarburi clorurati
- chetoni
- esteri
- paste abrasive

6.2.6 Cicli combinati zincatura+verniciatura

Qualora sia necessario raggiungere durabilità elevate del sistema anticorrosivo e per maggior estetica è possibile utilizzare i così detti "sistemi duplex", che prevedono in sequenza la realizzazione della zincatura a caldo e la successiva applicazione di un film verniciante.

Questi sistemi, sempre più utilizzati per le parti di strutture che rimangono esposte agli agenti atmosferici, consentono di ottenere una lunga protezione anticorrosiva senza rinunciare all'aspetto estetico dell'opera. Le norme di riferimento per questo sistema protettivo sono la UNI EN ISO 12944-5 [30] per le vernici liquide e la UNI EN 13438 [11] per la verniciatura a polvere. La zincatura a caldo sottostante deve essere realizzata secondo la UNI EN ISO 1461 [12]. Per la preparazione superficiale dell'elemento soggetto a zincatura+verniciatura a polvere si fa riferimento alla norma UNI EN 15773 [34], che può essere considerata un utile anche nel caso si utilizzino vernici liquide. La durabilità ottenuta è superiore alla mera somma delle singole durabilità di zincatura e verniciatura: un effetto sinergico fa sì che la durabilità aumenti dal 20% al 250% a seconda delle condizioni ambientali. I cicli di verniciatura da applicare vanno adeguati alla superficie dell'acciaio zincato, che presenta caratteristiche diverse da quello grezzo. In tal caso è bene rivolgersi a professionisti del settore (vanno richieste vernici in grado di offrire una buona e duratura aderenza sulla superficie zincata). In chiave "sostenibilità" questi sistemi, a fronte di un aumento dei costi iniziali comunque ragionevoli, consentono di ridurre, se non addirittura escludere, interventi di manutenzione nell'intero corso del ciclo di vita della struttura.

L'utilizzo dei sistemi duplex presume la ricerca di elevata durabilità e quindi l'utilizzo di cicli di verniciatura con durabilità elevate è da considerarsi basilare.

6.3 Tabella riassuntiva per soluzione di impalcato e rivestimento protettivo

Soluzione	Tipologia di acciaio	Peso kg/m ²	Peso Acciaio autopatinabile kg/m ²	Protezione con zincatura	Protezione con verniciatura		Ciclo combinato	
					Liquida	Polvere	Zinc.+ Vr liquida	Zinc.+ Vr a polvere
Multi-trave con profilo laminato	S460M	240	-	>50anni	>15anni	>15anni	>80anni	>80anni
	S355J0/J2	290	-	>50anni	>15anni	>15anni	>80anni	>80anni
	S355J2W	-	320	NO	NO	NO	NO	NO
Con travi a cassone chiuso	S355J0/J2	160	-	NO (**)	>15anni	NO	NO	NO
	S355J2W	-	192	NO	NO	NO	NO	NO
Travi a doppio T profili saldati	S355J0/J2	260	-	>50anni	>15anni	> 15anni	>80anni	>80anni
	S355J2W	-	286	NO	NO	NO	NO	NO
A travata reticolare con tubolari	S460NH	138	-	>50anni	>15anni	>15anni	>80 anni	>80anni
	S355NH	158	-	>50anni	>15anni	>15anni	>80 anni	>80anni

Tabella 6.17 - Tabella riassuntiva per soluzione di impalcato e rivestimento protettivo

La tabella sopra intende fornire dei dati sulle soluzioni analizzate con lunghezza di campata tipo di 35 m con riferimento al peso dell'acciaio considerato, al tipo di protezione, alle dimensioni massime dei singoli pezzi in funzione al tipo di protezione.

(*) Nell'ottica di avere opere in acciaio autopatinabile prestazionalmente equivalenti in termini di protezione alla corrosione rispetto gli acciai al carbonio con rivestimenti protettivi, si può pensare ad un sovrametallo sacrificale di:

- + 1 mm per anime e costole verticali, che non prestano il fianco a ristagni;
- + 1 mm/+2 mm per piattabande ed irrigidenti orizzontali, suscettibili di ristagni;

Il peso si riferisce ad un valore di calcolo e l'acciaio autopatinabile in ambiente aggressivo va utilizzato solo con sovrametallo sacrificale.

(**) Per quanto riguarda la tipologia a cassone chiuso, gli elementi interni come i diagonali traversi e la trave rompitratta possono essere zincati.

Nota: gli anni indicati in tabella si riferiscono al momento in cui deve essere eseguita la prima manutenzione.

7. Tempi di realizzazione, gestione del cantiere e manutenzione dei ponti in acciaio

7.1 Reperibilità dei prodotti in acciaio per ponti

Per le quantità e le qualità di acciaio utilizzate per gli schemi di ponte illustrate in questo documento tecnico, siano esse lamiere, profili aperti o tubolari la reperibilità dei materiali si colloca sui 30 gg per gli acciai non autopatinabili; per gli acciai autopatinabili, la disponibilità si aggira intorno ai 45 giorni con quantitativi minimi variabili a seconda del produttore.

In caso di laminazioni ad hoc possono servire dai 60 ai 90 giorni.

Tipicamente in un processo di pianificazione della costruzione, l'acquisto del materiale si colloca tra la progettazione definitiva e la progettazione esecutiva rimanendo in ombra tra le due fasi di progettazione.

7.2 Tempi di realizzazione dei trattamenti

Il tempo di realizzazione del trattamento di zincatura a caldo per manufatti consegnati in zincheria possono essere calcolati sulla base della capacità produttiva media, che per impianti di grandi dimensioni può giungere fino a 100 ton per turno di lavorazione.

Per la verniciatura i tempi medi per 30 t di materiale tra consegna al reparto del trattamento di verniciatura e carico per il trasporto in cantiere si attestano sui 10 giorni lavorativi.

7.3 Tempi di realizzazione dei manufatti in officina

Un'officina media produce circa 1000 tonnellate al mese dall'approvvigionamento delle materie prime.

7.4 Varo e montaggio delle campate

In funzione della tipologia di ponte e della luce si hanno diversi modi di procedere con il varo, ad esempio se il ponte ha una campata con luce modesta esso viene assemblato completamente a "terra" e poi posizionato sugli appoggi in calcestruzzo armato, ma per ponti con luci elevate e per schemi statici di travi su più appoggi la carpenteria metallica viene posizionata campata per campata fino al montaggio completo del ponte.



Figura 7.1 - Varo Cavalcavia via Cavallera, Castegnato (BS) e Ponte sul Piave S.P. 92 "delle Grave"

Per eseguire il varo della struttura metallica è opportuno che l'impresa rediga un Piano di Varo, che ha il compito di fornire le informazioni necessarie atte a comprendere le operazioni che porteranno il montaggio delle varie componenti dell'intera struttura. È importante prevedere dei golfari preventivamente assemblati in officina e/o a pie d'opera per il sollevamento degli elementi, ai quali andranno agganciate delle catene o funi di opportuna portata determinando il centro di tiro della fune principale movimentata da una gru o autogrù. Se si utilizzano due o più centri di tiro per il sollevamento è fondamentale che essi facciano parte dello stesso piano verticale passante per il centro della carpenteria allo scopo che gli elementi ruotino.

Soltamente vengono eseguiti dei modelli tridimensionali per prevedere i punti più idonei dove posizionare i golfari al di sopra dei traversi del ponte.

In base alle analisi delle condizioni di cantiere e della tipologia di sollevamento si predisponde la gru o autogrù per le fasi di varo.

Per quanto riguarda gli elementi prefabbricati della soletta sono solitamente messi in opera in avanzamento, sia per consentire il conseguente sviluppo sull'impalcato del mezzo di posa, sia per ottimizzare la fase di sigillatura e getto di connessione nelle tasche.

Quando le aree di cantiere attorno all'impalcato metallico sono facilmente raggiungibili mediante piste e piattaforme carrabili, gli elementi prefabbricati possono essere sollevati e posati in opera mediante una gru mobile automotrice operante nelle aree suddette.

Nel caso di solette totalmente prefabbricate, gli elementi sono messi in opera con carri-varo o altri mezzi d'opera o gru mobili tra la zona di consegna degli elementi prefabbricati e le posizioni in opera sull'impalcato. Tali mezzi devono essere in grado di avanzare sia sulle lastre già posate, sia sulle piattabande superiori delle travi principali metalliche in prossimità della zona di posa. Queste macchine possono essere gru mobili o macchine dedicate, costruite specificamente per il cantiere.

Nel caso di lastre prefabbricate a tutta larghezza, vanno verificate con cura le sollecitazioni durante le fasi transitorie di movimentazione e posa, poiché la lastra soggetta al solo peso proprio presenta una sezione resistente per flessione in senso trasversale notevolmente ridotta per la presenza delle tasche di connessione.

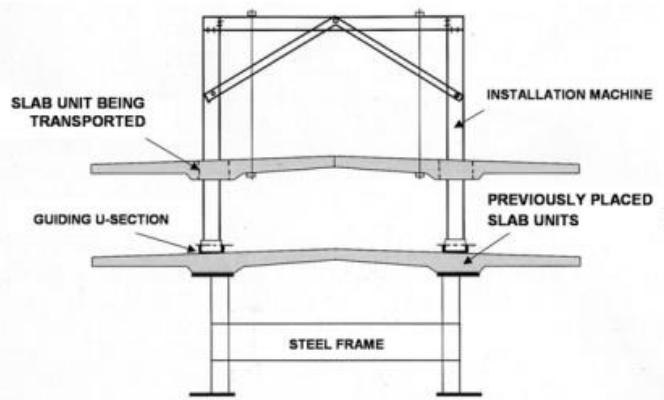


Figura 7.1 - Varo Cavalcavia via Cavallera, Castegnato (BS) e Ponte sul Piave S.P. 92 "delle Grave"

Infine, è fondamentale prevedere le tempistiche del varo, comprendendo i posizionamenti delle autogrù e il loro zavorramento, i tempi di sollevamento, spostamento e appoggio della carpenteria metallica sugli appositi appoggi precedentemente preparati soprattutto se vi è la necessità di chiudere la strada al traffico.

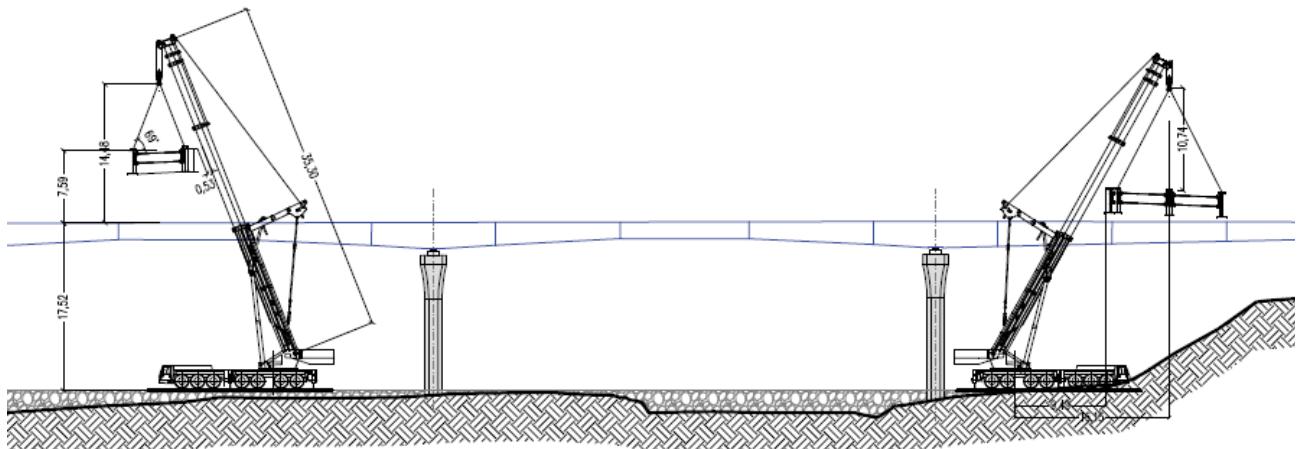


Figura 7.3 – Esempio di sezione di varo con indicazioni delle altezze in fase di montaggio

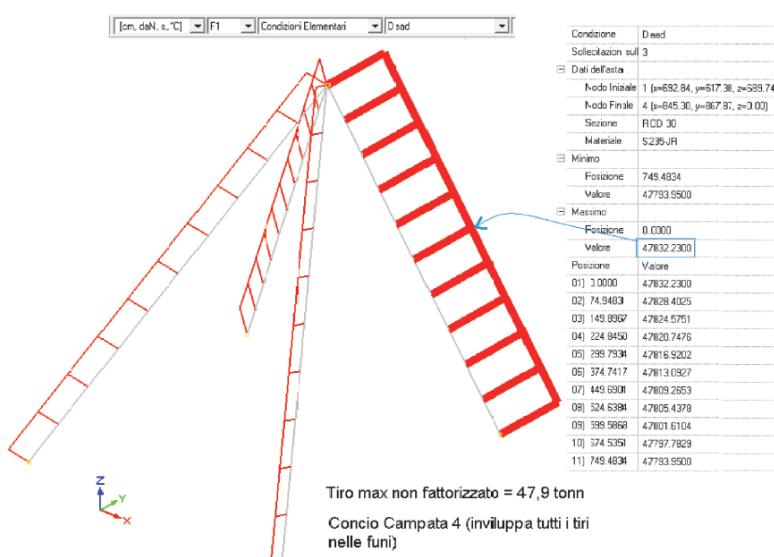


Figura 7.4 - Esempio di modellazione varo per il calcolo del tiro massimo delle funi

7.5 Piano di Manutenzione dei ponti in acciaio

Il piano di manutenzione introdotto con l'Articolo 38 del D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207 è un documento obbligatorio e complementare al progetto esecutivo che prevede, pianifica e programma le attività di manutenzione dell'intervento al fine di mantenerne nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l'efficienza ed il valore economico. Già le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 11 Gennaio 2008) introducono l'obbligo di allegare al progetto esecutivo il "Piano di Manutenzione della parte strutturale dell'opera" richiamato anche dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 [24].

Nella redazione del piano vanno individuati puntualmente i requisiti prestazionali e i controlli previsti dai Criteri Ambientali Minimi (CAM – D.M. 11 gennaio 2017) secondo quanto disposto dal nuovo Codice degli Appalti (Dlgs. 50/2016).

Il Piano di Manutenzione è costituito da 3 documenti operativi:

- Manuale d'uso;
- Manuale di manutenzione;
- Programma di manutenzione;

Il manuale d'uso si riferisce all'uso delle parti significative dell'opera. Il manuale contiene l'insieme delle informazioni che permettono di conoscere le modalità per la migliore utilizzazione del bene, nonché tutti gli elementi necessari per limitare quanto più possibile i danni derivanti da un'utilizzazione impropria, per consentire di eseguire tutte le operazioni atte alla sua conservazione che non richiedono conoscenze specialistiche e per riconoscere tempestivamente fenomeni di deterioramento anomalo al fine di sollecitare interventi specialistici. La natura dei ponti in carpenteria metallica non prevede prescrizioni d'uso particolari una volta garantita la resistenza agli sforzi definiti a norma di legge. Il manuale di manutenzione invece si riferisce alla manutenzione delle parti più importanti della struttura, con particolare riguardo alle opere che possono avere riflessi sulla sicurezza degli utilizzatori. Esso fornisce, in relazione alle diverse Unità Tecnologiche e alle caratteristiche dei materiali o dei componenti interessati, le indicazioni necessarie per la corretta manutenzione. Le Unità Tecnologiche riscontrabili in un ponte in carpenteria metallica sono le opere di fondazione, le strutture in elevazione in C.A le strutture in acciaio, le unioni, i giunti, la pavimentazione stradale, la segnaletica stradale verticale e orizzontale e i sistemi di sicurezza stradale. Per ogni Unità Tecnologica bisogna indicare i requisiti prestazionali secondo la norma in vigore ed è opportuno che venga suddivisa in diversi Elementi, analizzandoli uno ad uno si studiano i probabili difetti riscontrabili che si potrebbero dimostrare durante la vita nominale dell'opera e di conseguenza verranno indette manutenzioni specializzate inerenti ad ogni difetto. Il manuale di manutenzione deve contenere la collocazione nell'intervento delle parti menzionate, la rappresentazione grafica, la descrizione delle risorse necessarie per l'intervento manutentivo, il livello minimo delle prestazioni, le anomalie riscontrabili e le manutenzioni eseguibili a cura di personale specializzato. Il programma di manutenzione si realizza, a cadenze prefissate temporalmente al fine di una corretta gestione dell'opera d'arte e delle sue parti nel corso degli anni. Esso si articola in tre sottoprogrammi, il sottoprogramma delle prestazioni, che prende in considerazione, per classe di requisito, le prestazioni fornite dalla struttura e dalle sue parti nel corso del suo ciclo di vita. Il sottoprogramma dei controlli, che definisce il programma delle verifiche al fine di rilevare il livello prestazionale (qualitativo e quantitativo) nei successivi momenti della vita del bene, individuando la dinamica della caduta delle prestazioni aventi come estremi il valore di collaudo e quello minimo di norma. Infine, si redige il sottoprogramma degli interventi di manutenzione che riporta in ordine temporale i differenti interventi di manutenzione, al fine di fornire le informazioni per una corretta conservazione del bene.

8. Sostenibilità

8.1 Il riciclo dell'acciaio

L'acciaio è un materiale riciclabile all'infinito ed è infatti il materiale più riciclato al mondo. Al termine della vita utile di un'opera, l'acciaio dismesso può essere facilmente riciclato fino al 99% (*) grazie alla separazione agevole dagli altri materiali, ottenendo così un nuovo materiale che avrà le stesse proprietà meccaniche di quello di origine o anche migliori, mentre la parte restante potrebbe essere recuperata come inerte per uso stradale. Questa caratteristica lo rende una vera e propria "risorsa permanente", essenziale in una visione economica di tipo circolare.

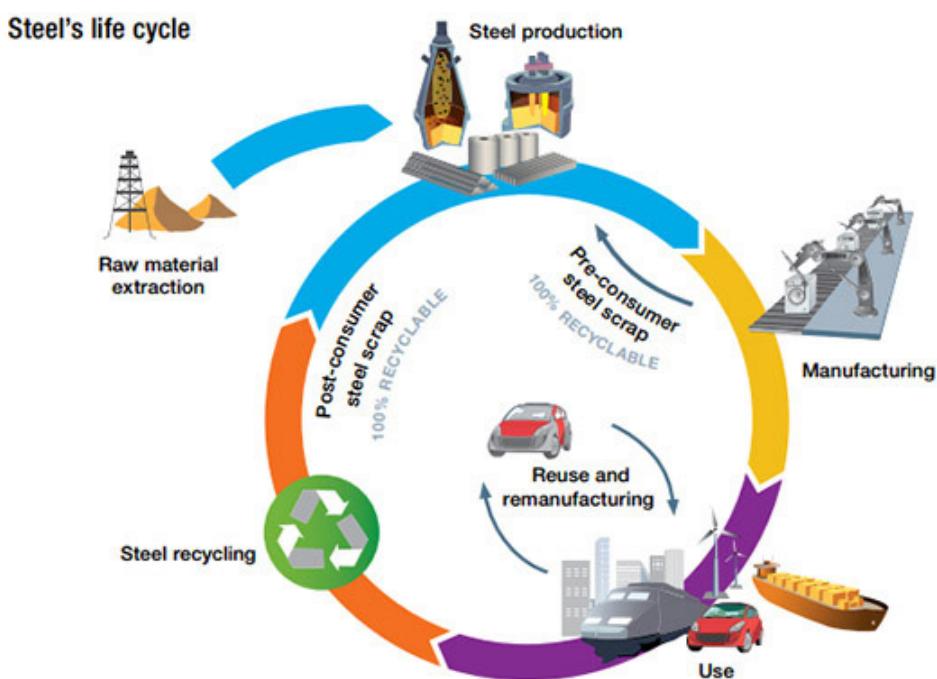


Figura 8.1 – Ciclo di vita dell'acciaio. Fonte: Worldsteel Association

Il riciclo evita inoltre il consumo di altre risorse energetiche necessarie per la produzione di materiali da materie prime fresche di estrazione e comporta la diminuzione del carico ambientale, delle emissioni di CO₂ e di altri inquinanti.

La completa riciclabilità e la durabilità dell'acciaio permettono pertanto un minor consumo delle materie prime e di conseguenza uno sviluppo e una gestione economica delle infrastrutture più sostenibile in confronto a opere realizzate con altri materiali da costruzione. Queste caratteristiche si adeguano perfettamente alle richieste da parte delle normative vigenti del raggiungimento di determinati obiettivi ambientali, nei confronti delle pubbliche amministrazioni in materia di opere pubbliche.

(*) Fonte i produttori di acciaio europei.

8.2 Normativa vigente

Il vasto panorama normativo mira a conseguire determinati obiettivi in materia di sostenibilità ambientale, principalmente dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici, dei rifiuti e dell'emissione di sostanze inquinanti.

La progettazione per lavori di ristrutturazione, nuova costruzione e manutenzione per le opere pubbliche, secondo il nostro sistema normativo deve essere basata su dei Criteri Ambientali Minimi (CAM), che sono i requisiti a cui è necessario fare riferimento al fine di conseguire determinati obiettivi ambientali, come stabilito dall'art. 34 del Codice degli Appalti – D.lgs.18 aprile 2016, n. 50.

I CAM vengono disciplinati dai decreti emanati dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. L'ultimo aggiornamento è stato pubblicato con il Decreto 11 ottobre 2017 - *Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*.

Per l'acciaio in particolare, al §2.4.2.5, il suddetto decreto stabilisce che per gli usi strutturali deve essere utilizzato acciaio prodotto con un contenuto minimo di materiale riciclato con i seguenti limiti:

- Contenuto minimo di materiale riciclato pari a 70% per acciaio da forno elettrico
- Contenuto minimo di materiale riciclato pari a 10% per acciaio da ciclo integrale

È possibile affermare esplicitamente che i prodotti in acciaio garantiscono tali livelli minimi di materiale riciclato. Negli ultimi anni in Italia, infatti, la produzione dell'acciaio ottenuta attraverso il riciclo del rottame ha superato il 75%, grazie alla preponderante diffusione del forno elettrico e ai rilevanti investimenti che i produttori siderurgici hanno compiuto in campo ambientale, garantendo i contenuti minimi di materiale riciclato e ottenendo pertanto le opportune certificazioni ambientali per i loro prodotti. L'acciaio, anche quando è sottoposto a trattamenti protettivi quali la zincatura a caldo, rispetta i requisiti prescritti dai Criteri Ambientali Minimi.

8.3 Certificazioni ambientali

Sempre secondo quanto riportato al §2.4.2.5 del Decreto 11 ottobre 2017, le percentuali citate in precedenza devono essere dimostrate tramite una delle seguenti certificazioni:

- 1) "...Una dichiarazione ambientale di prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025 [23], come EPDIItaly© o equivalenti...", ossia una dichiarazione che quantifica gli impatti ambientali associati al ciclo di vita del prodotto. Tali valutazioni avvengono attraverso un'analisi di tipo LCA (Life Cycle Assessment);
- 2) "...Una certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità che attesti il contenuto di riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa, come ReMade in Italy © o equivalenti...", ossia una dichiarazione ambientale di TIPO I in accordo con la norma ISO 14024 [21];
- 3) "...Una certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità che attesti il contenuto di riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa che consiste nella verifica di una dichiarazione ambientale autodichiarata, conforme alla norma ISO 14021 [22]...", ossia una dichiarazione ambientale TIPO II.

La Dichiarazione Ambientale di Prodotto EPD

Fra le dichiarazioni ambientali, quelle di TIPO III risultano le più complete e contengono informazioni ottenute mediante un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali, confrontabili e credibili relativamente ad un prodotto, processo o attività mediante un'analisi del ciclo di vita (LCA) in accordo con gli standard della serie ISO 14040 [37] e, per ogni tipo di prodotto o servizio per le costruzioni, con la norma *UNI EN 15804 [23] – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto*.

La più conosciuta è probabilmente l'EPD®, una dichiarazione che certifica un determinato prodotto, fornendo dati sugli impatti ambientali legati alla produzione di una specifica quantità. Tale sistema viene verificato da un ente terzo ed è una certificazione di tipo volontario. La Dichiarazione fa riferimento all'analisi dell'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività basandosi su uno studio LCA, valutandone per ogni fase gli impatti economici ed ambientali, quali il consumo di risorse (materie prime, acqua, energia), la produzione di rifiuti e di emissioni in atmosfera e gli scarichi nei corpi idrici.

Le fasi minime considerate sono il ricavo e la lavorazione della materia prima, il trasporto al sito di produzione fino alla produzione stessa. Possono essere inclusi nell'analisi anche il trasporto al cantiere, la messa in opera, l'uso, la manutenzione, la dismissione, lo smaltimento, il riuso ed il riciclo.

I risultati sono presentati in forma sintetica attraverso l'impiego di una serie di indicatori ambientali, come ad esempio la quantità di anidride carbonica emessa o il GWP (Global Warming Potential) per unità dichiarata di prodotto (ad es. per tonnellata).

Il processo di una EPD® passa attraverso la redazione dei seguenti documenti:

- I requisiti specifici di prodotto (Product Category Rules, PCR)
- Un'analisi LCA, in base alle indicazioni presenti nei PCR, nelle linee guida del sistema EPD® e secondo le indicazioni contenute all'interno delle norme ISO 14040 [37] e 14044[38].
- La Dichiarazione ambientale. I contenuti della EPD® devono essere analizzati e verificati da un ente terzo indipendente, che ne effettua la convalida.

La gran parte delle EPD® viene resa disponibile dai produttori ed è facilmente scaricabile dal web, ad esempio da www.environdec.com, sito che raccoglie le EPD® da diversi paesi a livello mondiale.

8.4 Life Cycle Assessment (LCA)

Il Life Cycle Assessment è una "qualifica ambientale" del prodotto o processo che può essere utilizzata in varie forme e come strumento di comunicazione.

Lo studio LCA viene condotto in accordo ai seguenti standard e requisiti: *UNI EN ISO 14040:2006 - Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento* [37], *UNI EN ISO 14044:2018 - Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida* [38], *UNI EN ISO 14025:2010 Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations, General Programme Instructions for Environmental Product Declarations*, ultima versione 3.0 (11-12-2017). In particolare, per i ponti e più in generale per le infrastrutture il calcolo delle prestazioni ambientali e la relativa dichiarazione EPD sono regolati dalle Product Category Rule for bridges, elevated highways and tunnels: UN CPC 53221, 53222, ultima versione 1.11 (26-02-2019).

Tra le principali fasi di analisi c'è la definizione dei confini del sistema, i quali sono suddivisi in tre macro-moduli:

- Upstream module (noto anche come Modulo A), che contiene i processi a "monte". Per le infrastrutture, i processi a monte vengono intesi come la produzione e l'approvvigionamento delle materie prime e dei materiali, compreso il loro trasporto in cantiere;
- Core module (noto anche come Modulo B), che racchiude i processi "centrali". In questo caso, la fase di costruzione dell'opera;
- Downstream module (noto anche come Modulo C), che rappresenta l'insieme dei processi a valle. In tal caso essi sono la fase di esercizio dell'infrastruttura, la manutenzione, il rifacimento di alcune parti, l'uso (viabilità) ed il fine vita dell'opera stessa.

Esiste anche un Modulo D di notevole importanza, ma purtroppo non obbligatorio. Questo modulo infatti tiene in conto nell'analisi del ciclo di vita non solo i processi di produzione di materie prime, costruzione, manutenzione e fine vita precedentemente descritti, ma anche eventuali possibilità di reimpiego del materiale dismesso. L'acciaio ottenuto dal riciclo, a seguito di rifusione nei forni elettrici ad arco, è un materiale che preserva tutte le sue caratteristiche meccaniche del materiale di origine. Nel mondo anglosassone questa proprietà viene indicata sinteticamente con il termine up-cycling, per creare una distinzione con i materiali che, invece, sono soggetti a perdite di proprietà e impiegati in applicazioni di livello inferiore (down-cycling). I produttori dispongono pertanto di un'apposita parte, Modulo D, in cui è possibile inserire i dati relativi al destino del materiale a fine vita, da cui è possibile ricavare i crediti concernenti il riciclo sugli indicatori di sostenibilità. Grazie ad esso il progettista potrebbe avere uno strumento in più nella valutazione degli impatti ambientali per i prodotti da costruzione.

Anche l'industria della zincatura a caldo è stata sempre molto attenta nello sviluppo dei propri processi produttivi agli aspetti connessi alla sostenibilità ambientale: è una delle poche attività ad essersi dotata già da qualche anno dello strumento dell'Analisi del Ciclo di Vita – LCA e della Dichiarazione Ambientale di Prodotto – EPD® settoriale.

8.4.1 Esempi di LCA per soluzioni di campata in acciaio

Al fine di una migliore comprensione dei concetti riguardanti il Life Cycle Assessment, in seguito viene sinteticamente trattato un esempio di LCA, applicato alle soluzioni di campata in acciaio presentate nei paragrafi precedenti (4.2, 4.3, 4.4 e 4.5).

Nello specifico, vengono prese in esame le soluzioni progettuali per una singola campata da 35 m, valutando per ciascuna l'impatto ambientale dal modulo A al modulo D, escludendo il modulo B a causa dell'aleatorietà delle fasi inerenti all'uso della struttura, che comunque essendo considerate identiche per tutti i quattro casi ne consente di escluderlo. L'analisi dei trattamenti protettivi viene presentata al successivo paragrafo, appositamente dedicato.

Per tutte le soluzioni si è ipotizzato l'impiego di una soletta in calcestruzzo armato gettato in opera (C30/37).

Per il calcolo dell'incidenza del trasporto si è inoltre ipotizzato quanto segue:

- Trasporto su gomma per gli elementi in carpenteria metallica e le armature, con distanza fissata a 500 km;
- Distanza percorsa per trasporto calcestruzzo mediante betoniere di 50 km.

In relazione al Modulo A, si è rinvenuta un'incidenza del trasporto poco rilevante rispetto alle altre componenti. Si possono registrare incrementi nell'ordine dell'1÷2%, considerando una distanza percorsa di 1000 km per il trasporto dei componenti in acciaio.

Tipologie di campata	Quantitativo acciaio per carpenteria metallica [t]	Global Warming Potential [t _{CO₂eq}]			
		Modulo A	Modulo C	Modulo D	Totale
Multitrave con profilo laminato - Acciaio S460M	97	180,24	5,88	-14,17	171,95
Trave a cassone chiuso - Acciaio S355	74	208,05	5,63	-68,40	145,28
Bi-trave doppio T composta saldata - Acciaio S355	109	316,54	5,49	-128,76	193,27
Trave reticolare con profili tubolari - Acciaio S460NH	58	120,15	4,77	-8,63	116,29

I risultati delle analisi vengono espressi in quantità di anidride carbonica emessa [t_{CO₂eq}]. I calcoli sono stati condotti attraverso l'utilizzo del software AMECO v.3.02®.

8.4.2 Impatto ambientale: confronto dei differenti sistemi anticorrosivi

È stata eseguita una successiva analisi con lo scopo di mettere a confronto gli impatti ambientali dovuti ai differenti trattamenti anticorrosivi. A tal proposito in questo caso è stato effettuato uno studio LCA per una sola delle soluzioni presentate nei paragrafi precedenti, ritenuto sufficientemente esaustivo per la comprensione, in particolare l'esempio di campata singola da 35 m con soluzione multitrave con profilo laminato (paragrafo 4.2).

La quantità di acciaio per carpenteria sottoposta a trattamento protettivo è di 97 tonnellate. Ipotizzando una vita utile di 50 anni ed una classe di corrosività C₃, sono stati messi a confronto tre differenti sistemi protettivi: un trattamento protettivo mediante zincatura a caldo, un trattamento mediante verniciatura ed uno combinato (zincatura + verniciatura).

Tipologia di trattamento protettivo	Durabilità attesa [anni]	N. Interventi di manutenzione straordinaria	Global Warming Potential		
			Emissioni per trattamento protettivo [tCO ₂ eq]	Emissioni interventi manutenzione [tCO ₂ eq]	Totale emissioni su vita utile (50 anni) [tCO ₂ eq]
Zincatura a caldo	>> 50	0	274,43	0,00	274,43
Verniciatura	15	4	290,07	168,24	458,31
Zincatura + Verniciatura	>> 50	0	325,99	0,00	325,99

Come si evince dalla tabella, la soluzione meno impattante risulta essere la zincatura a caldo, seguita dal ciclo combinato ed infine dalla verniciatura. Quest'ultima sembrerebbe competitiva all'atto della prima verniciatura (290,07 tCO₂eq emessa), ma non altrettanto se considerato l'impatto sull'intera vita utile dell'opera (458,31 tCO₂eq emessa), dovendo considerare gli interventi di manutenzione straordinaria.

Al contrario, nel caso di zincatura a caldo e di ciclo combinato (zincatura +verniciatura) non viene considerato nessun intervento di manutenzione straordinaria, dal momento che garantiscono una durabilità di gran lunga superiore a 50 anni. Nella scelta del sistema di protezione contro la corrosione risulta infatti importante valutare anche gli interventi di manutenzione straordinaria durante l'intero ciclo di vita.

Un altro importante aspetto da considerare riguarda l'eventuale mancata fruizione della struttura, qui non valutata, durante gli interventi di manutenzione straordinaria: 4 per la verniciatura e 0 per zincatura e ciclo combinato.

Tavole di Progetto

Al link di seguito riportato è possibile scaricare le tavole di progetto in formato PDF per una migliore consultazione.

Le tavole sono oggetto di copyright e di proprietà esclusiva di Anas e Fondazione Promozione Acciaio. E' espressamente vietato il riutilizzo a fini commerciali o nella pratica professionale. L'utente non potrà altresì modificare le tavole o redistribuirle.

Qualsiasi utilizzo delle tavole di progetto è responsabilità esclusiva dell'utente.

Per scaricare le tavole visitare il link:

<https://www.promozioneacciaio.it/doc/tavole-quaderno-anas-fpa/>

Le tavole sono scaricabili anche su www.stradeanas.it

Per visualizzare le tavole si consiglia l'utilizzo di Adobe Reader o software/app di lettura PDF.

Tavole allegate

- 1A) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 2x2 HL1000A-qualità acciaio S460
Lunghezza di campatati: 25,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 1B) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 2x2 HL1000M-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 2A) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 6 HE1000A-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 2B) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 6 HE1000M-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 3A) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 6 HL1100M-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 35,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 3B) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 6 HL1100x548-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 35,00 m - Traverso in calcestruzzo armato;
- 4A) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 4 HL1000A-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 Campate continue - Traverso in calcestruzzo armato
- 4B) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 4 HL1000M-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 Campate continue - Traverso in calcestruzzo armato;
- 4C) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 4 HL1000A-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 Campate continue - Traverso in carpenteria metallica;
- 4D) Soluzione Multi-trave con profilo laminato 4 HL1000M-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 Campate continue - Traverso in carpenteria metallica;
- 5A) Soluzione con travi a cassone-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 35,00 m;
- 5B) Soluzione con travi a cassone-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 35,00 m - 5 campate continue;
- 6A) Soluzione con travi a doppio T-bi-trave lamiera composta saldata-qualità acciaio S335
Lunghezza campata tipo: 25,00 m;
- 6B) Soluzione con travi a doppio T-bi-trave lamiera composta saldata-qualità acciaio S335
Lunghezza campata tipo: 35,00 m;
- 6C) Soluzione con travi a doppio T-bi-trave lamiera composta saldata-qualità acciaio S335
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 campate continue;
- 7A) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 25,00 m;
- 7B) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m;
- 7C) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 35,00 m;
- 7D) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 35,00 m;
- 7E) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S460
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 campate continue;
- 7F) Soluzione a travata reticolare con tubolari a sezione circolare-qualità acciaio S355
Lunghezza campata tipo: 25,00 m - 5 campate continue.

TAVOLA 1A

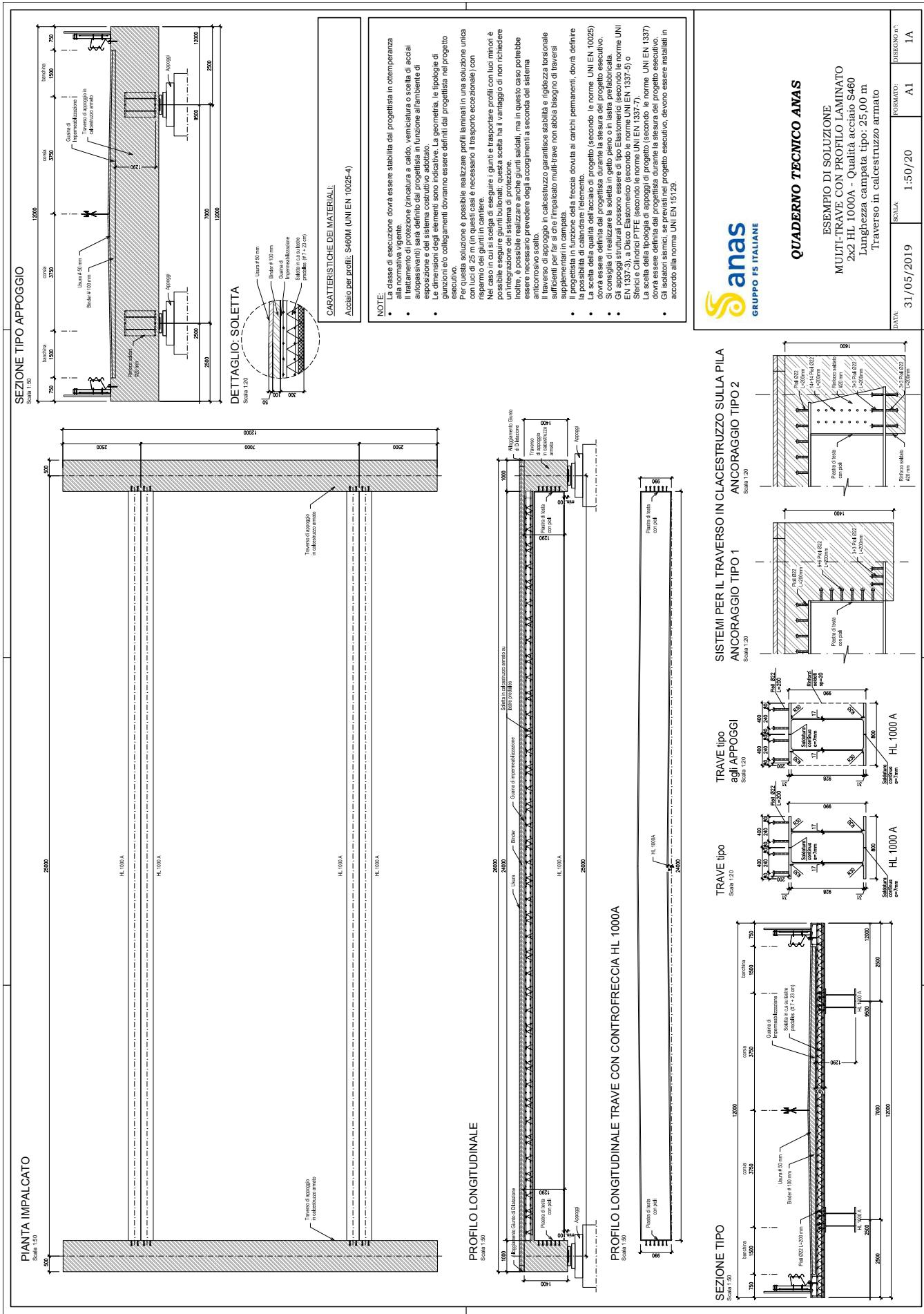


TAVOLA 1B

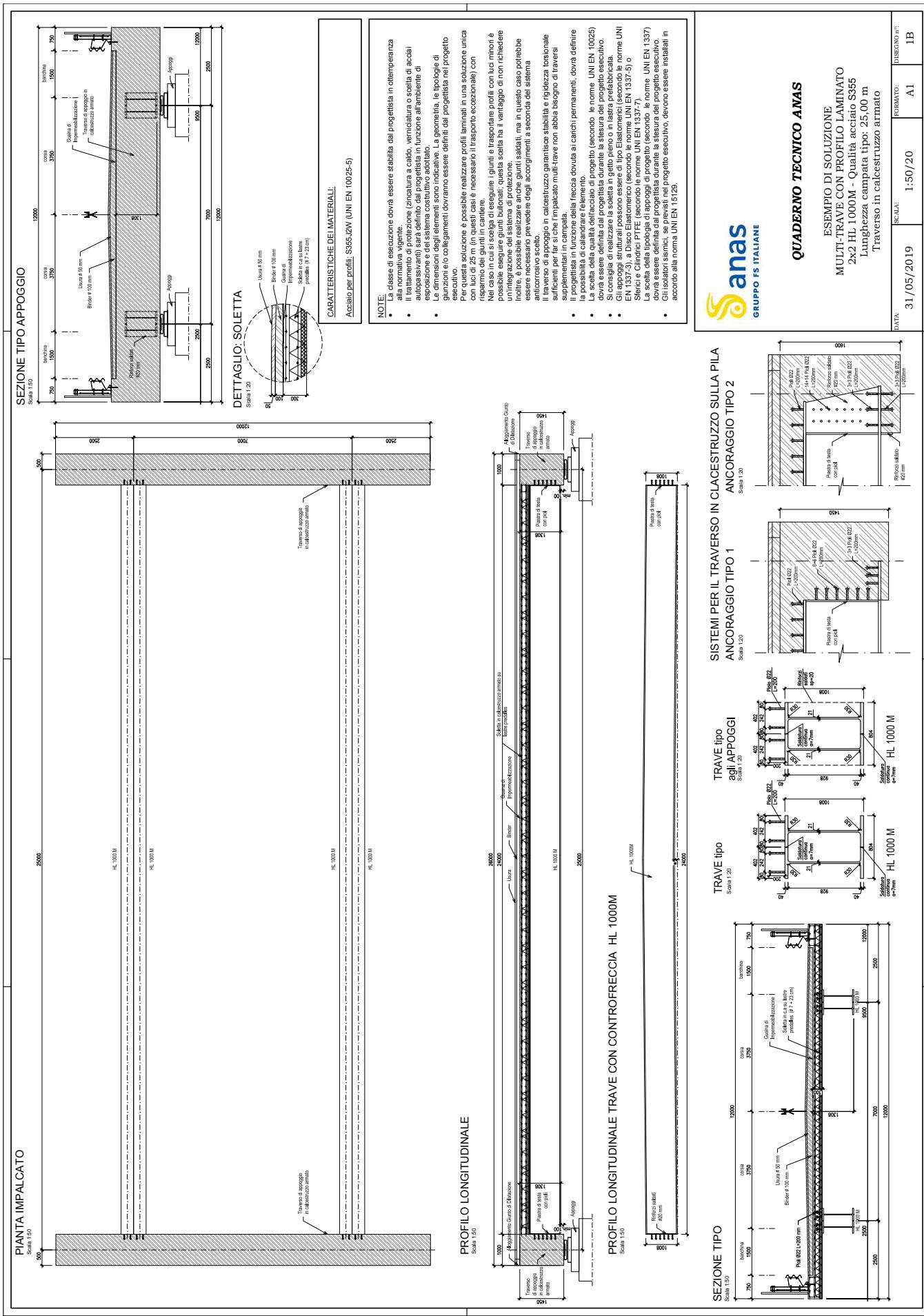


TAVOLA 2A

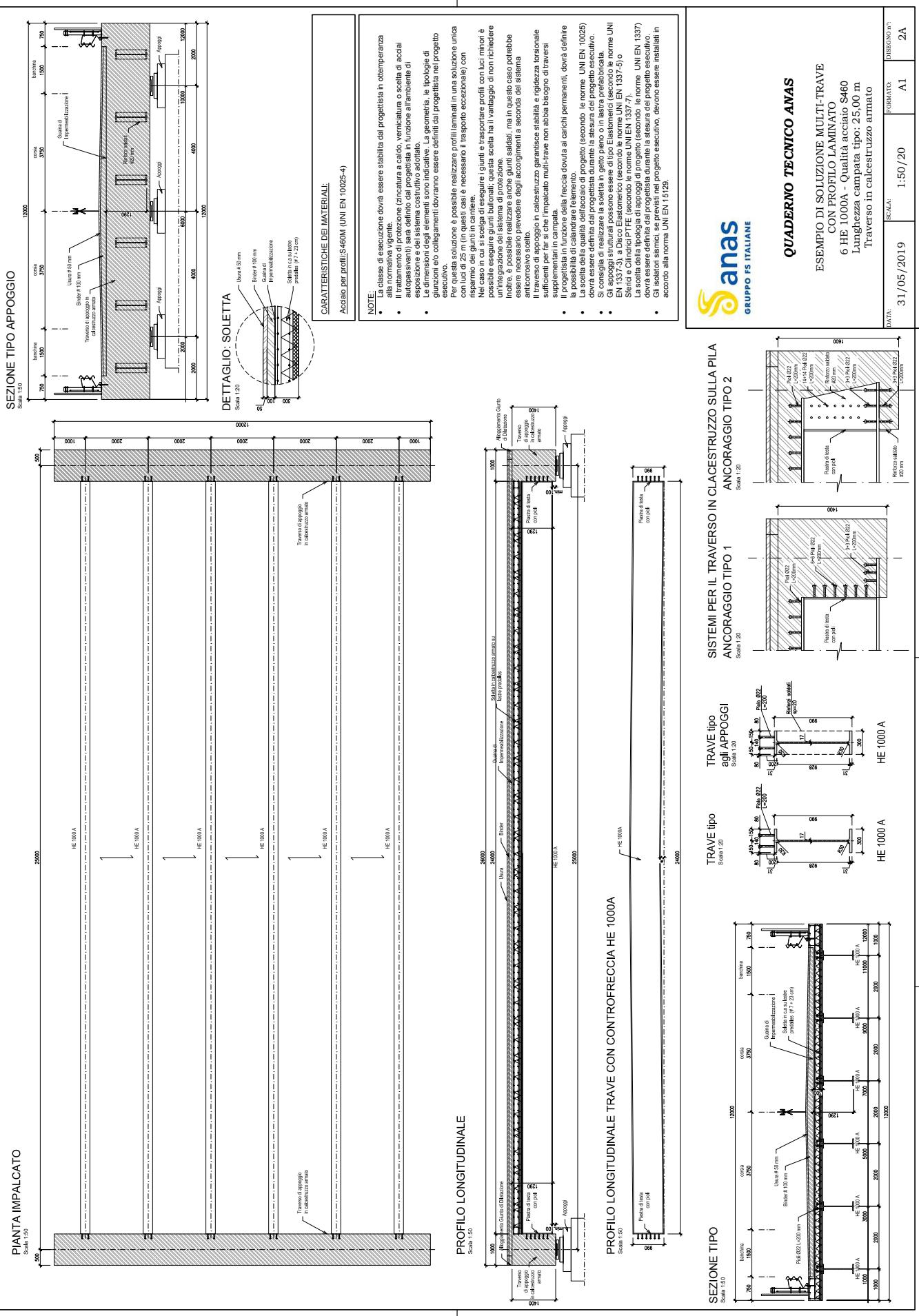


TAVOLA 2B

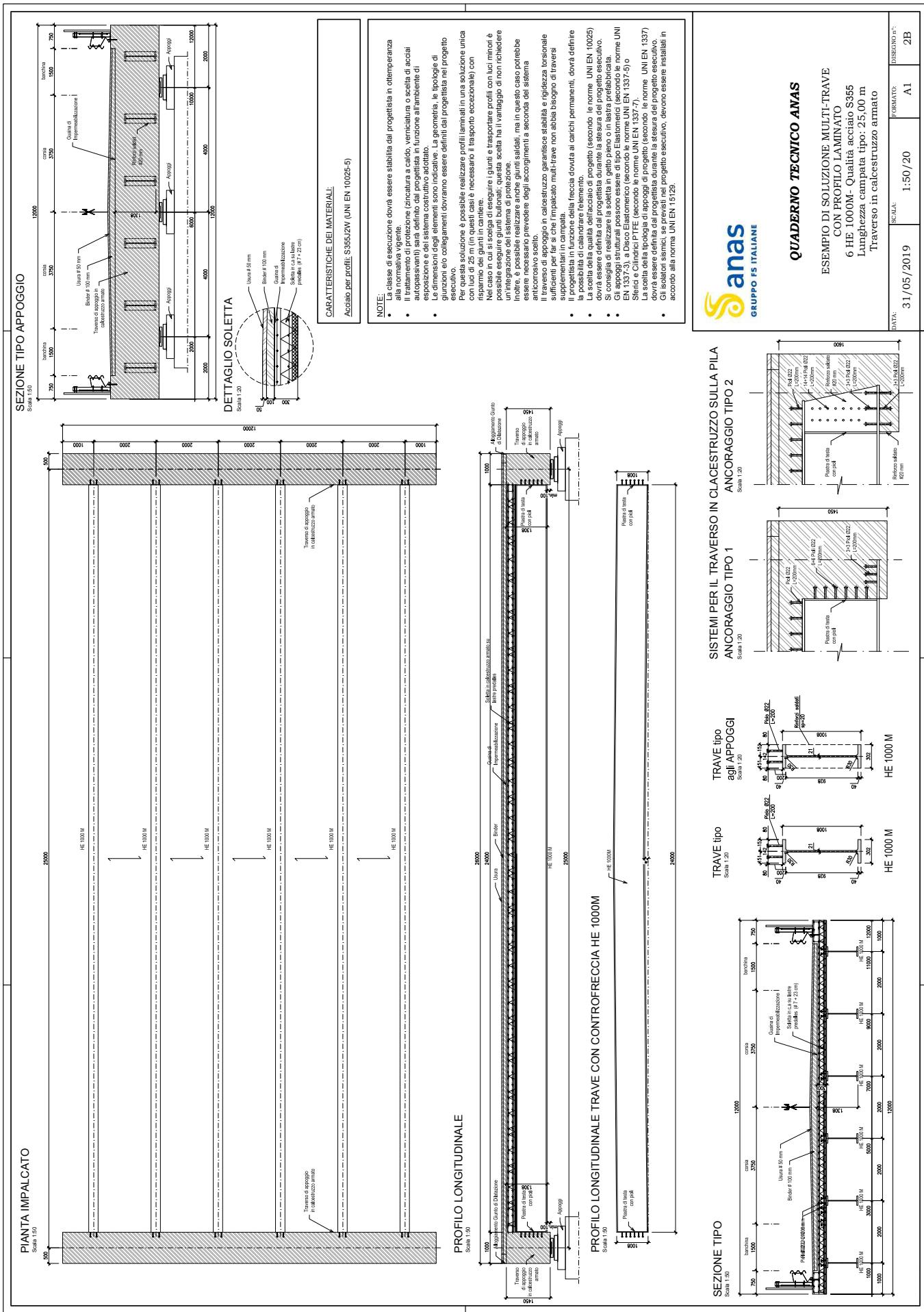


TAVOLA 3A

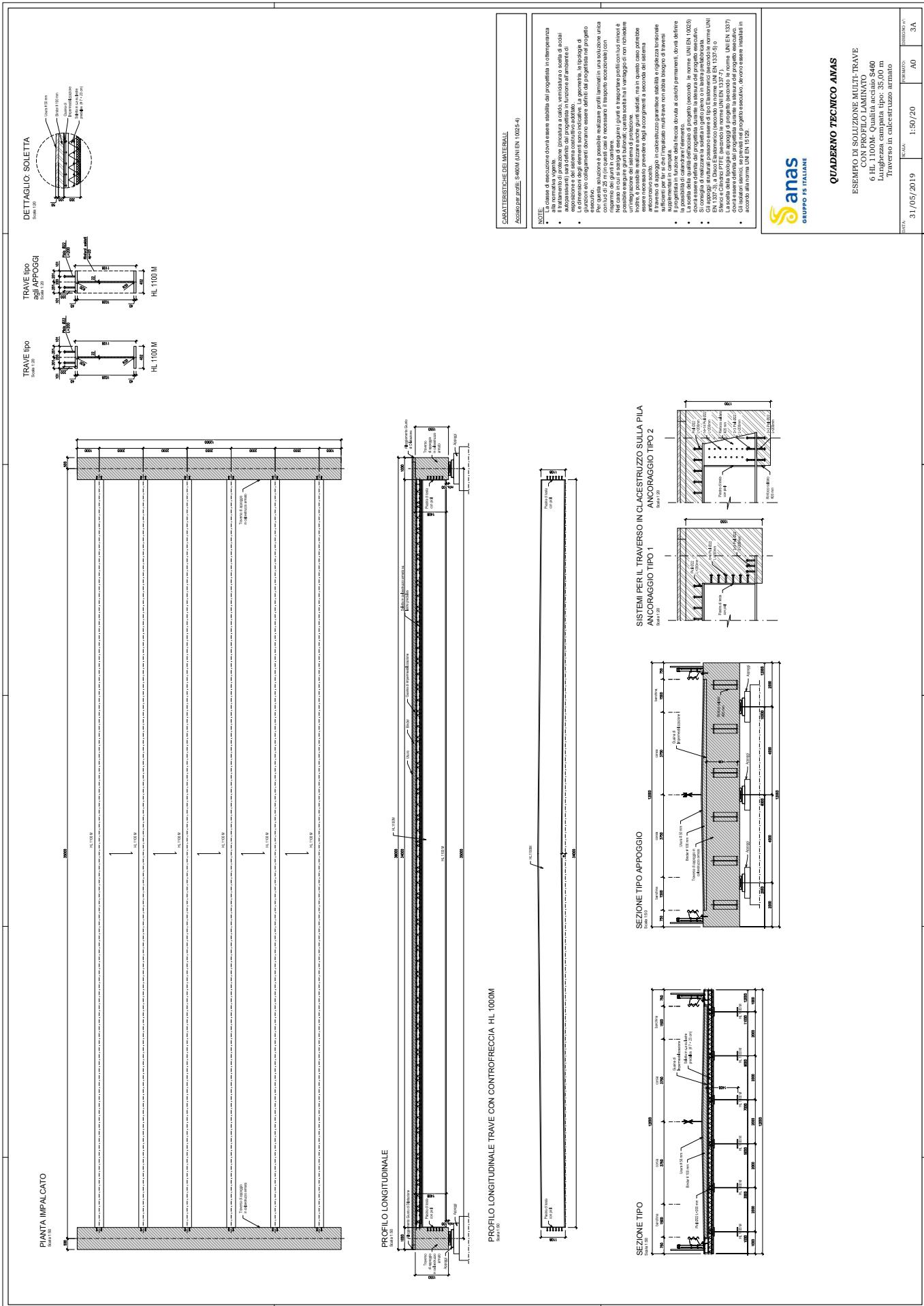


TAVOLA 3B

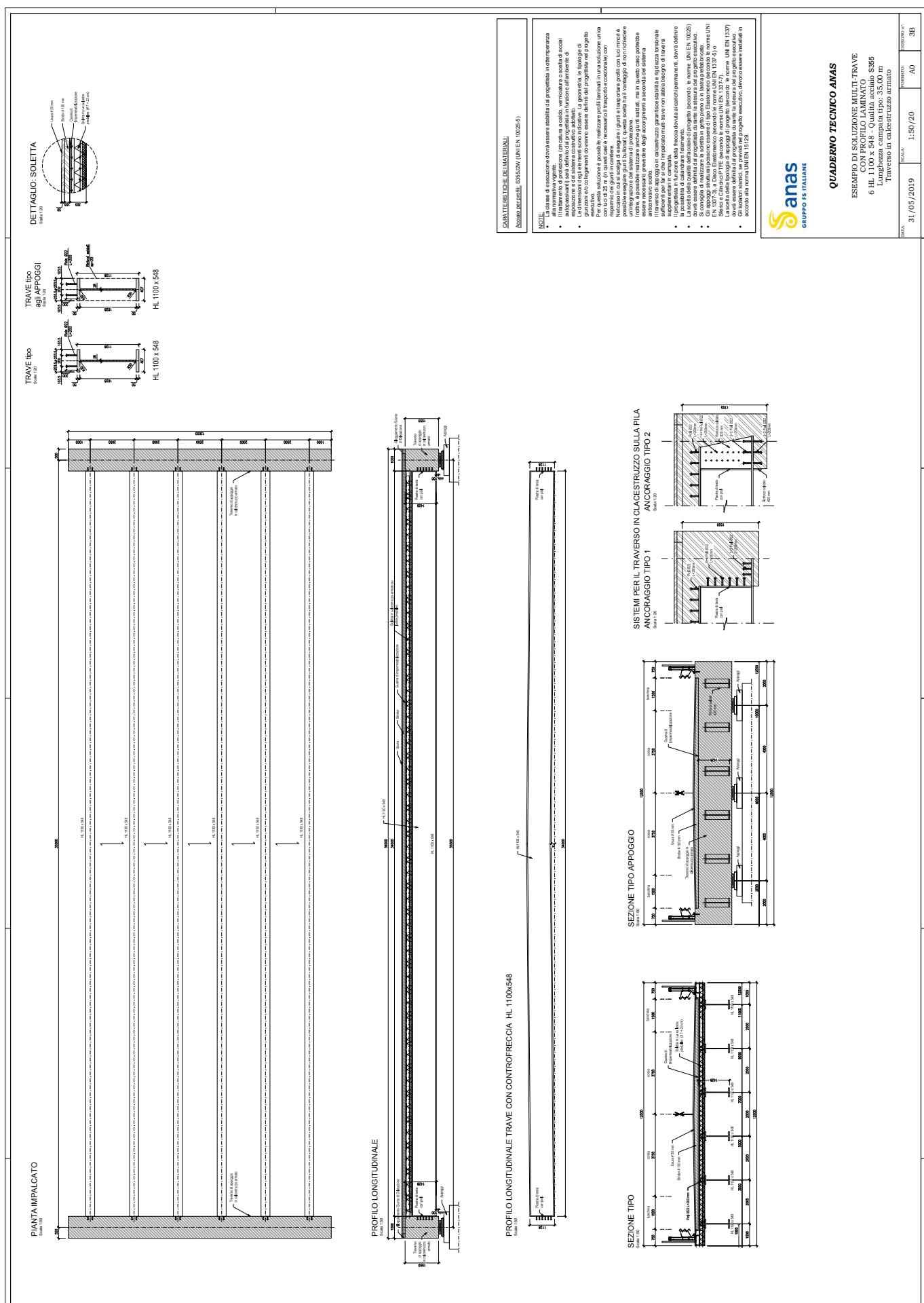


TAVOLA 4A

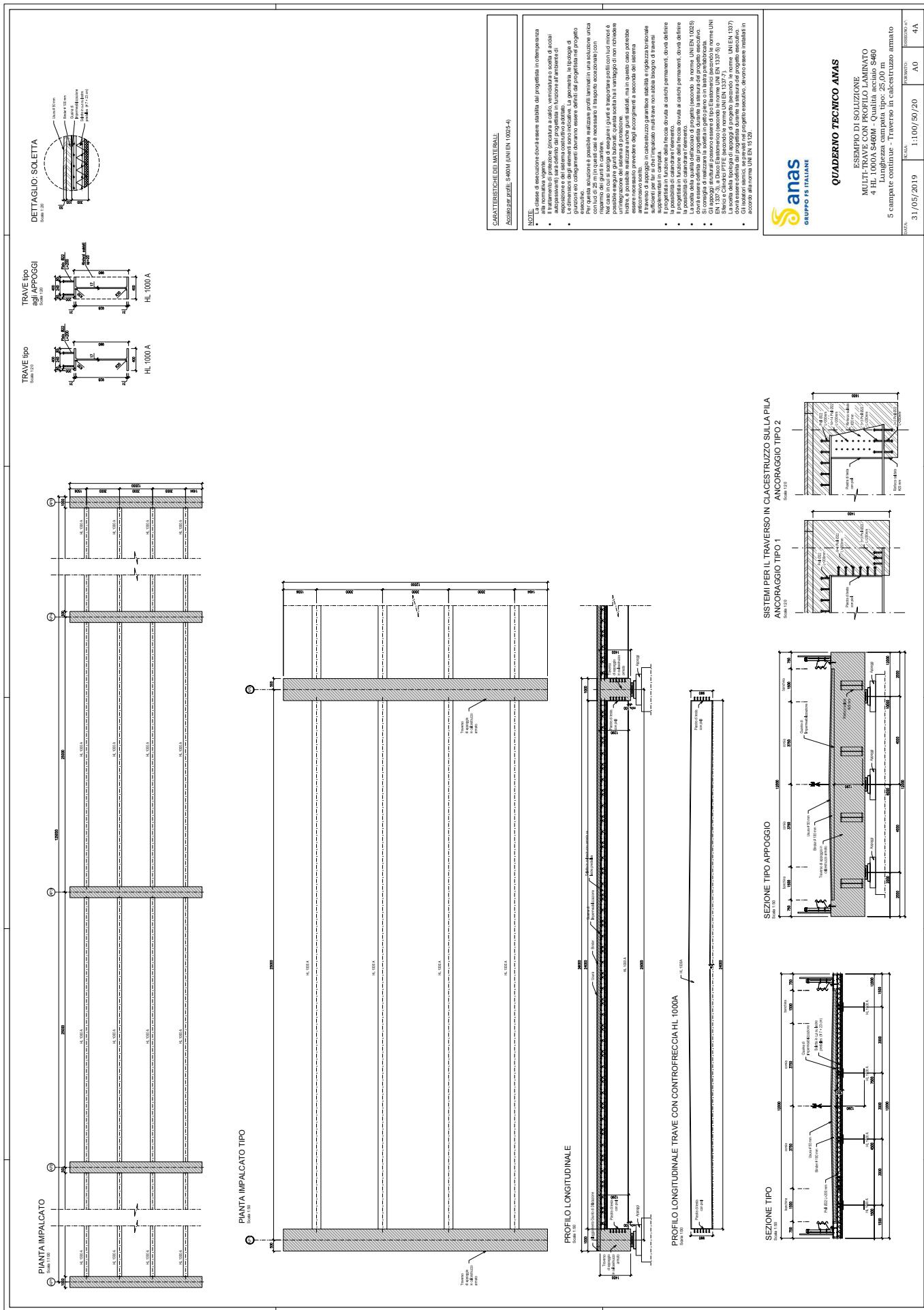


TAVOLA 4B

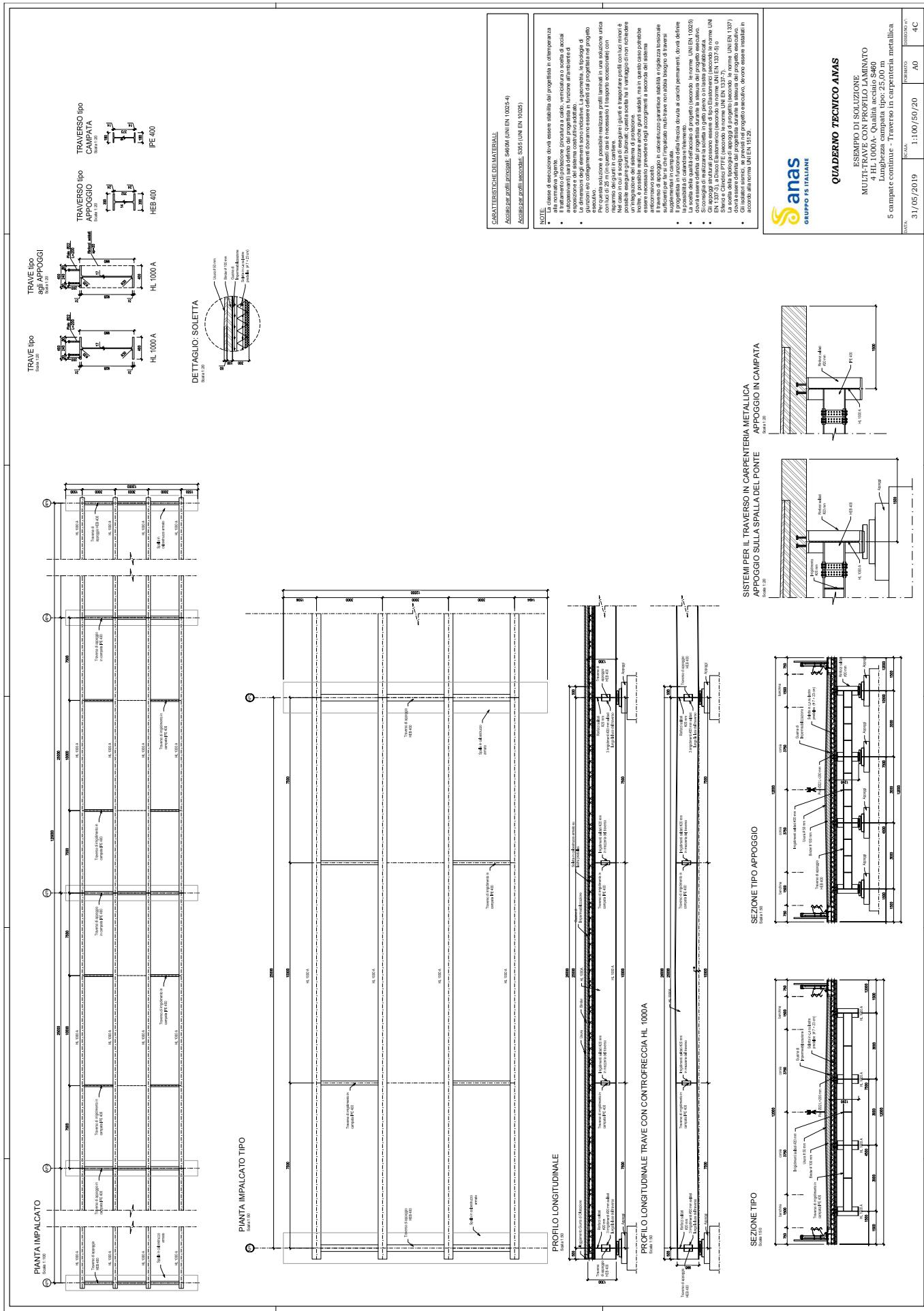


TAVOLA 4C

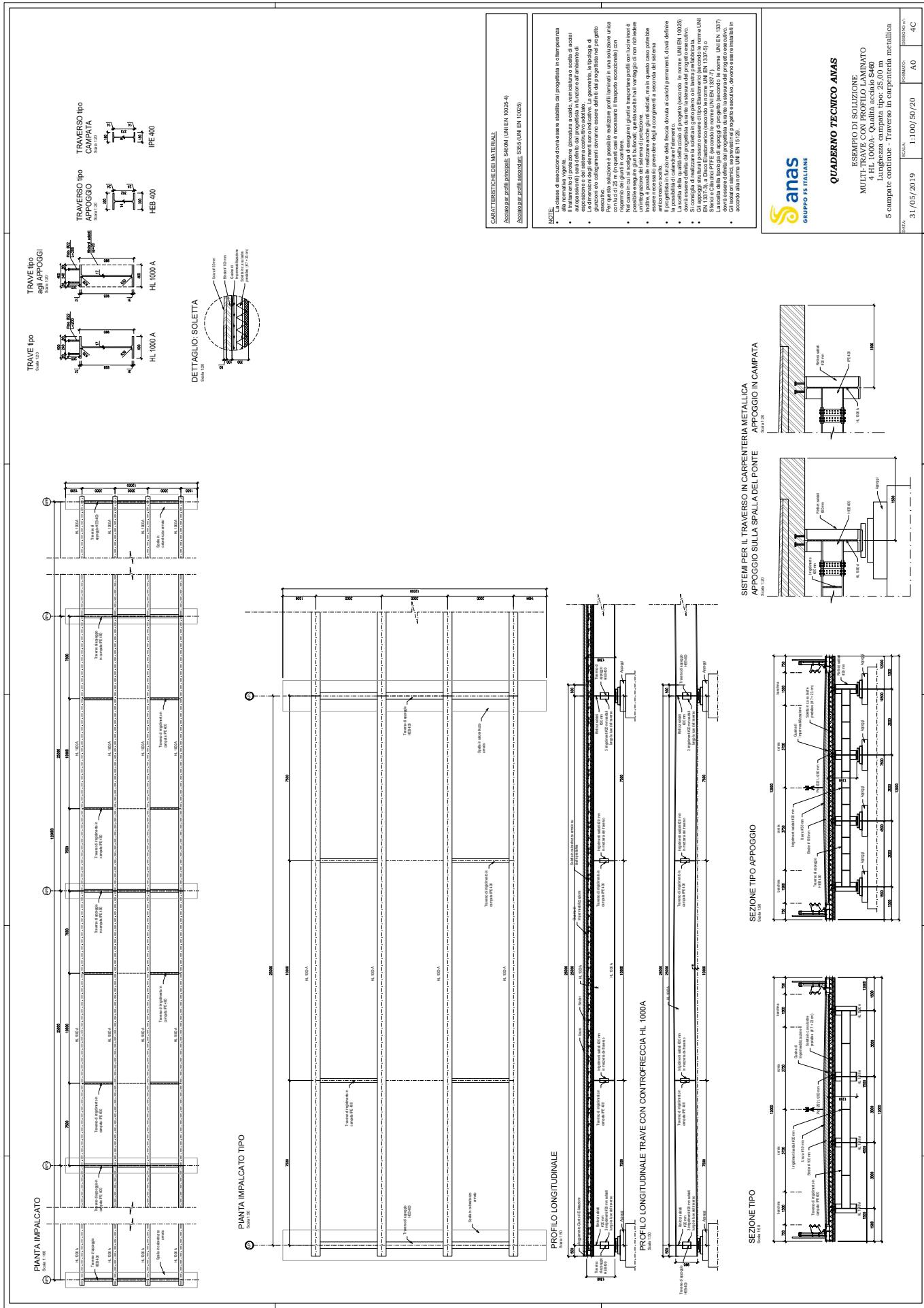


TAVOLA 4D

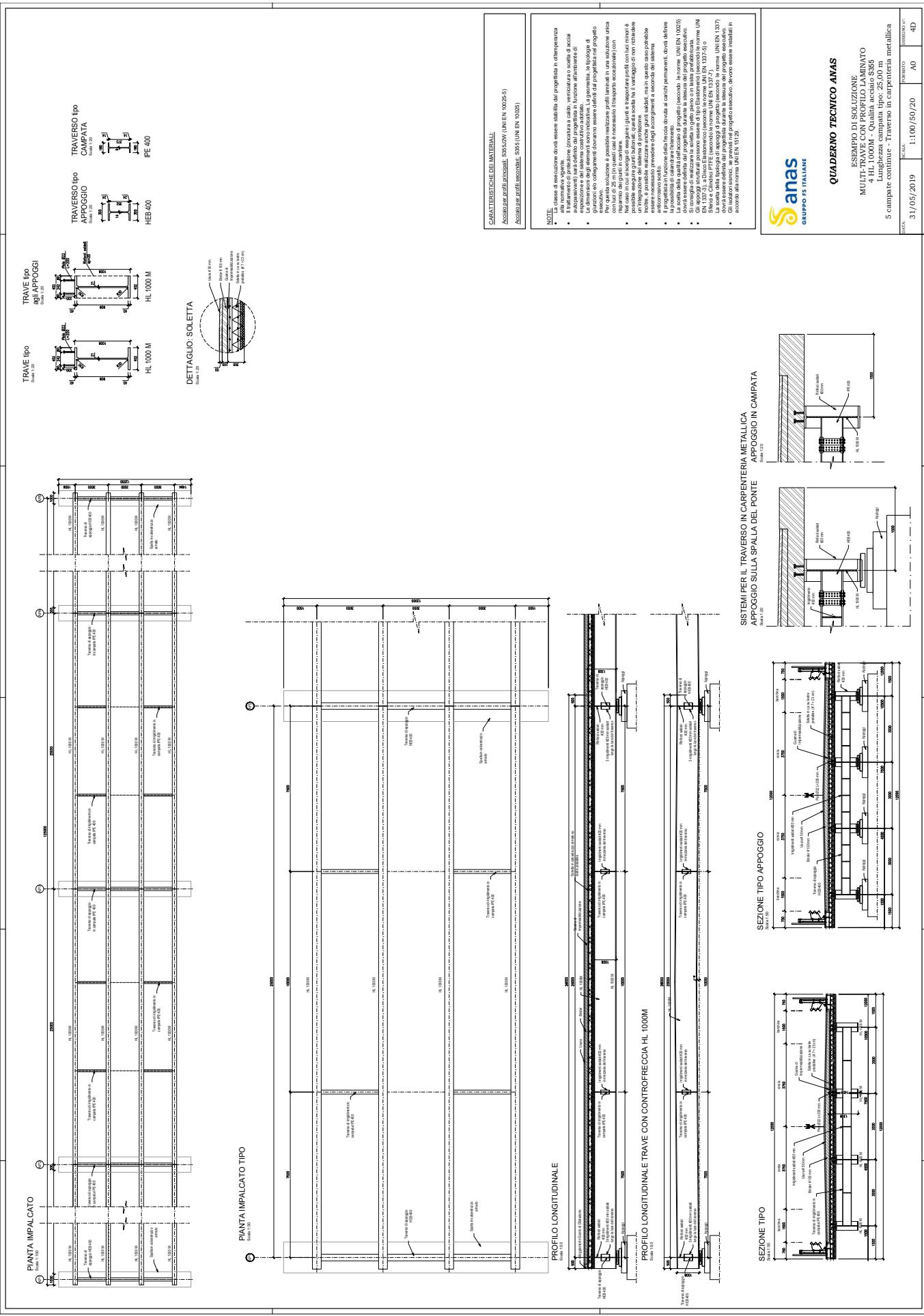


TAVOLA 5A

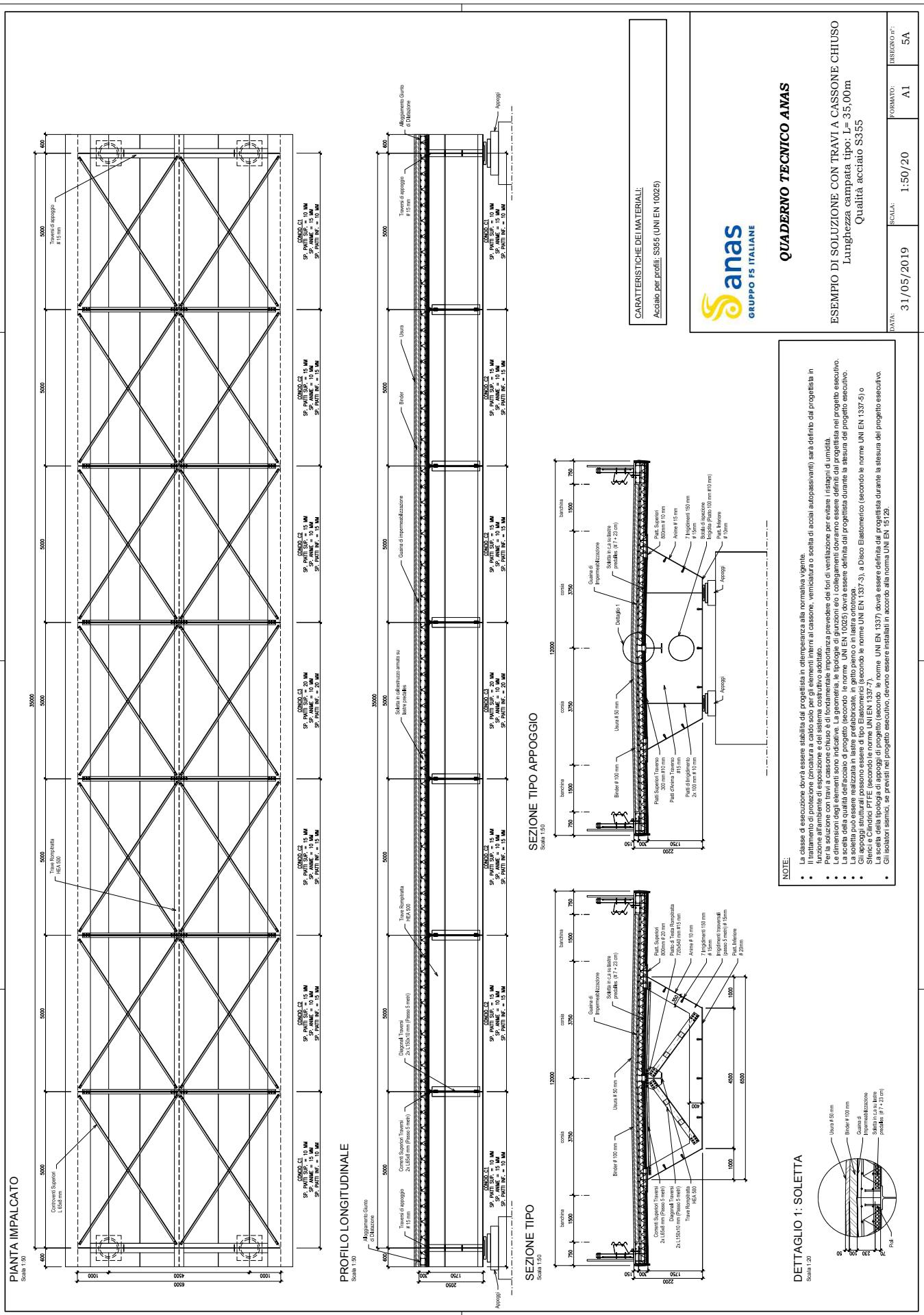


TAVOLA 5B

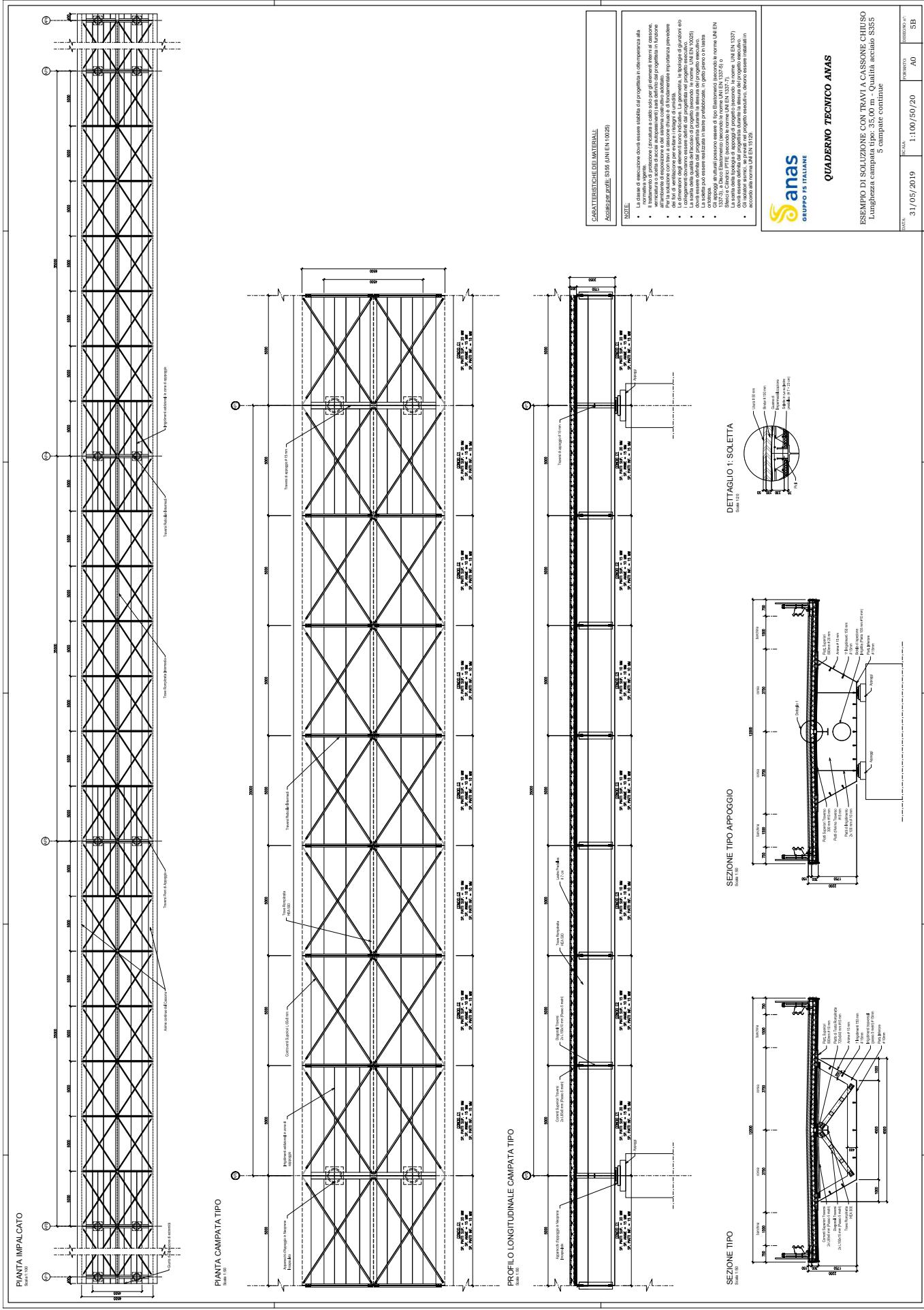


TAVOLA 6A

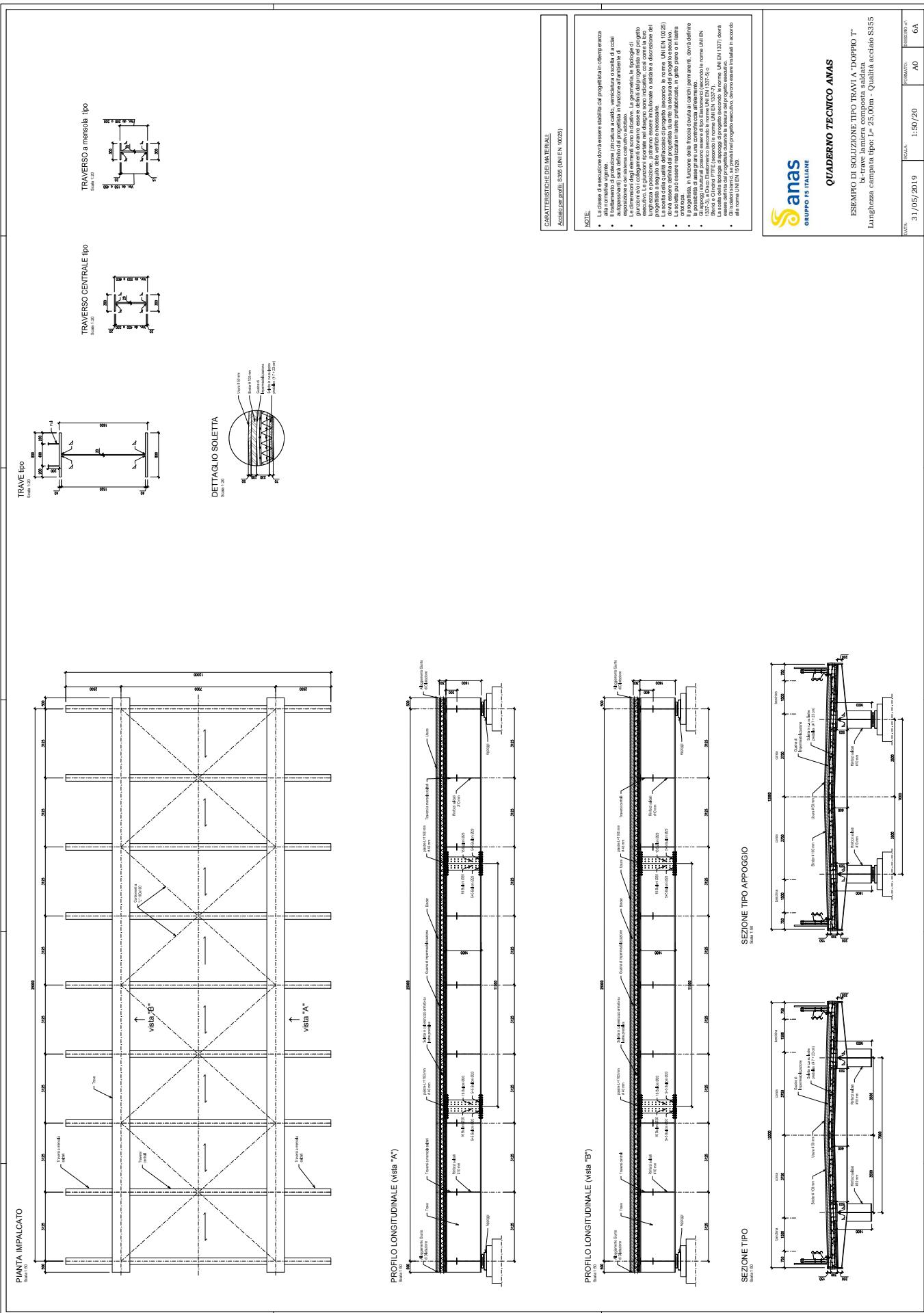


TAVOLA 6B

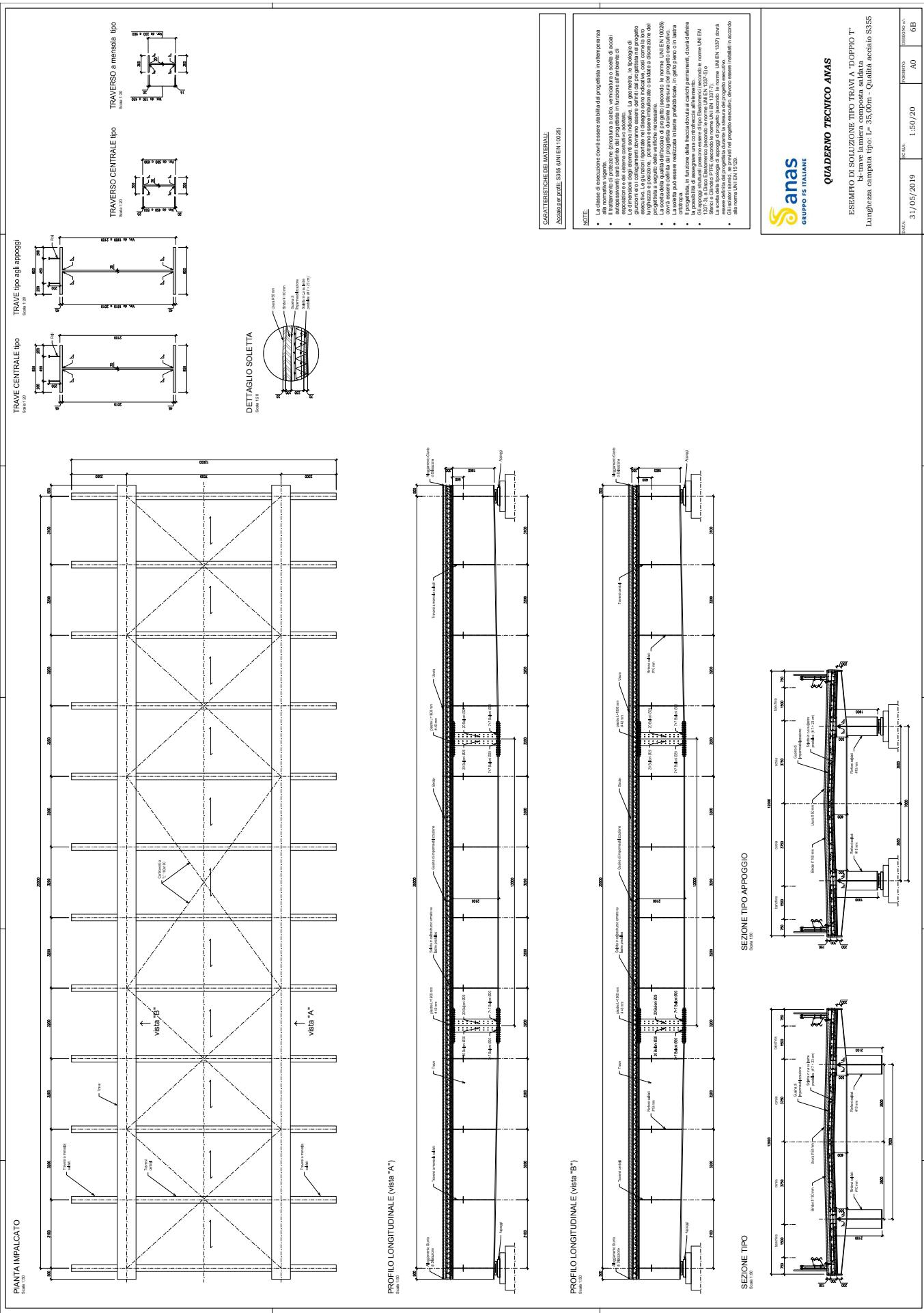


TAVOLA 6C

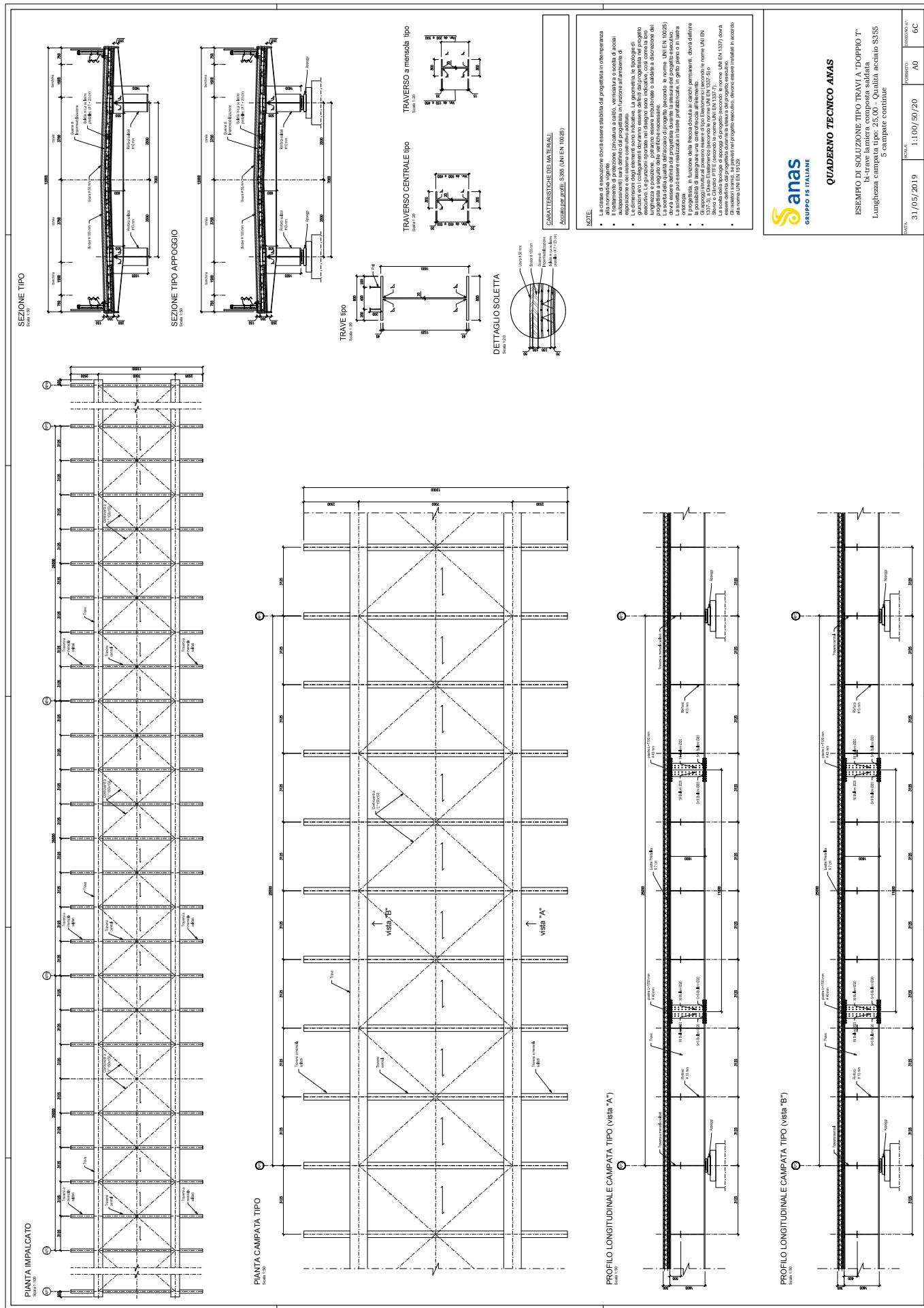


TAVOLA 7A

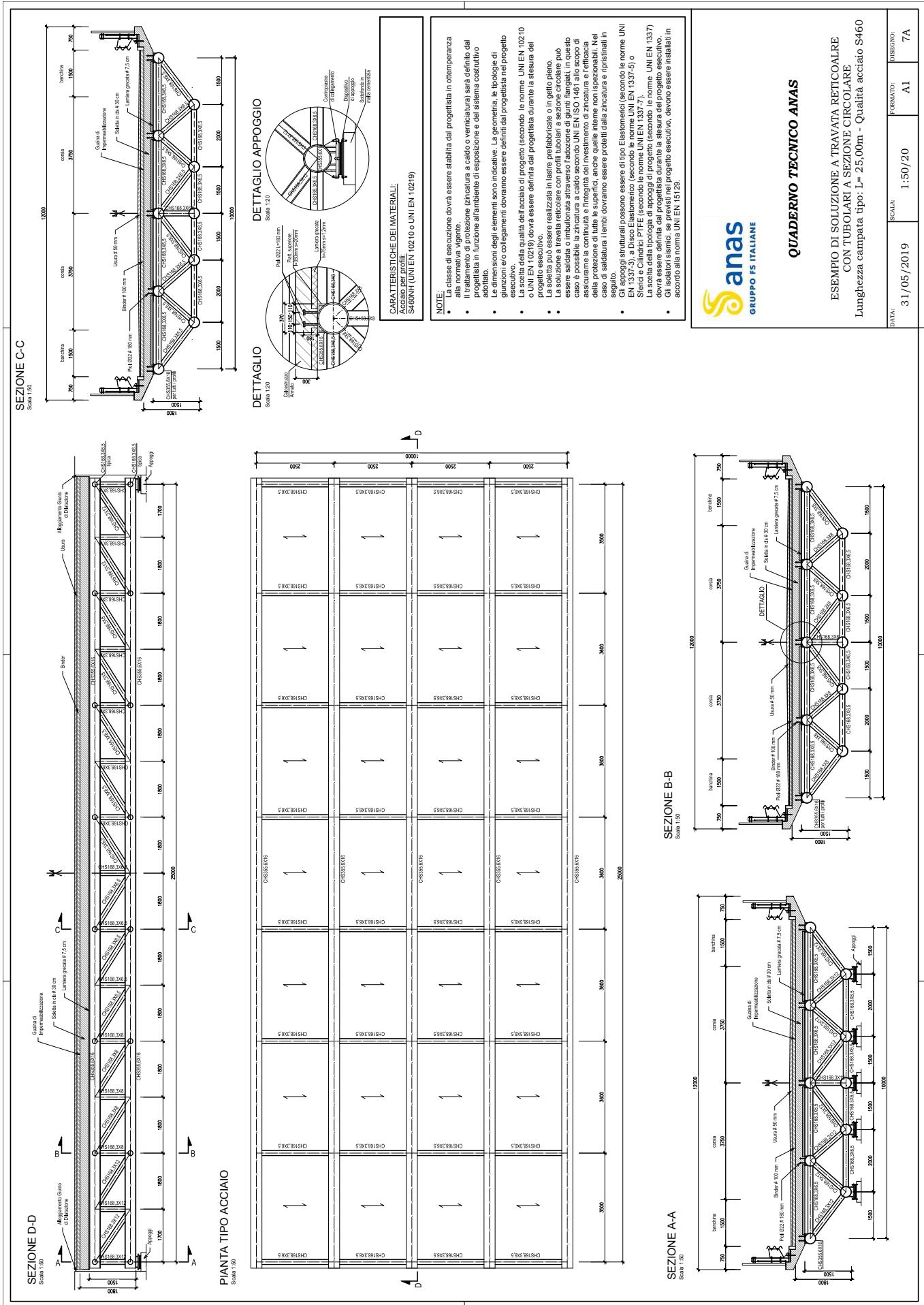


TAVOLA 7B

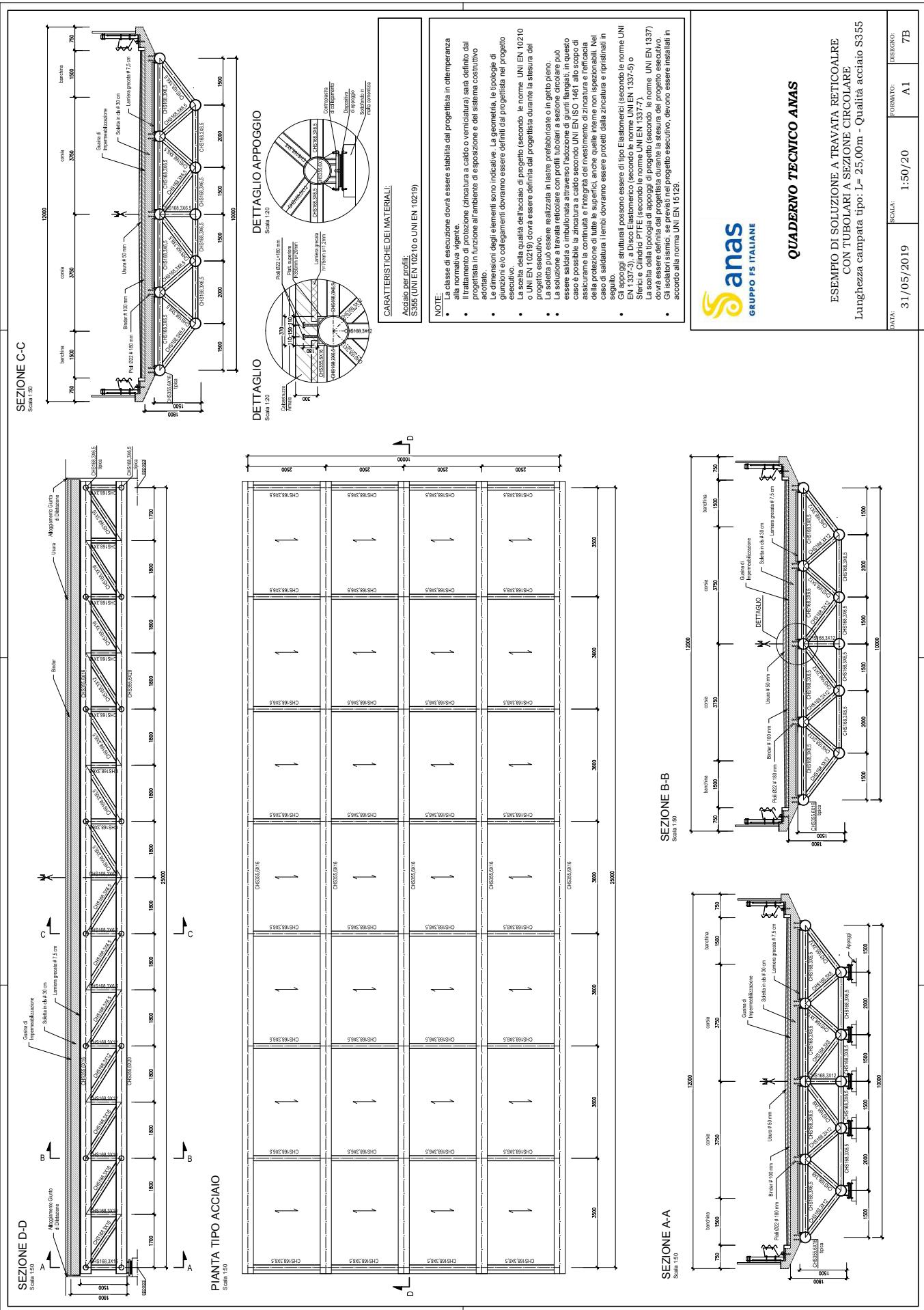


TAVOLA 7C

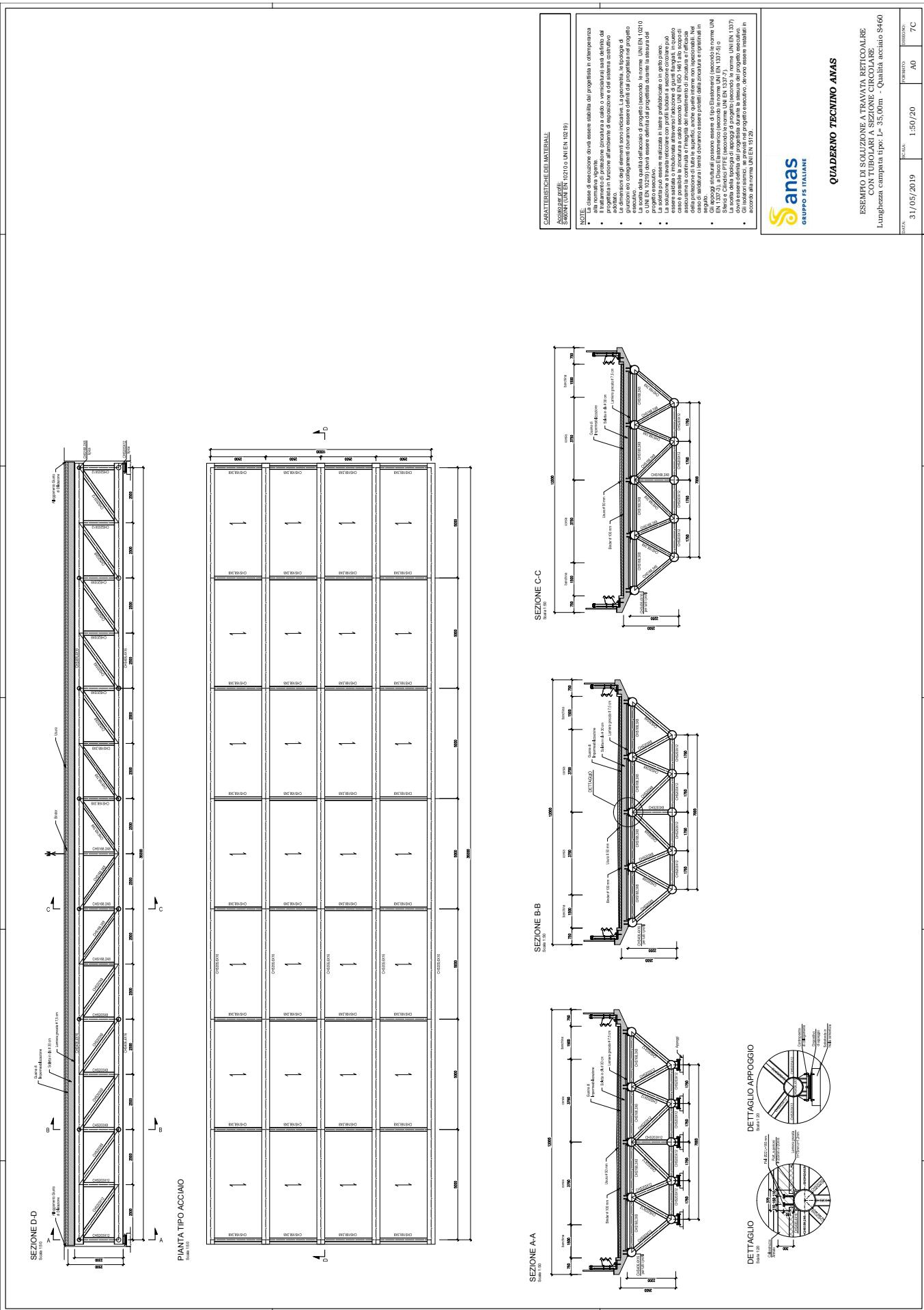


TAVOLA 7D

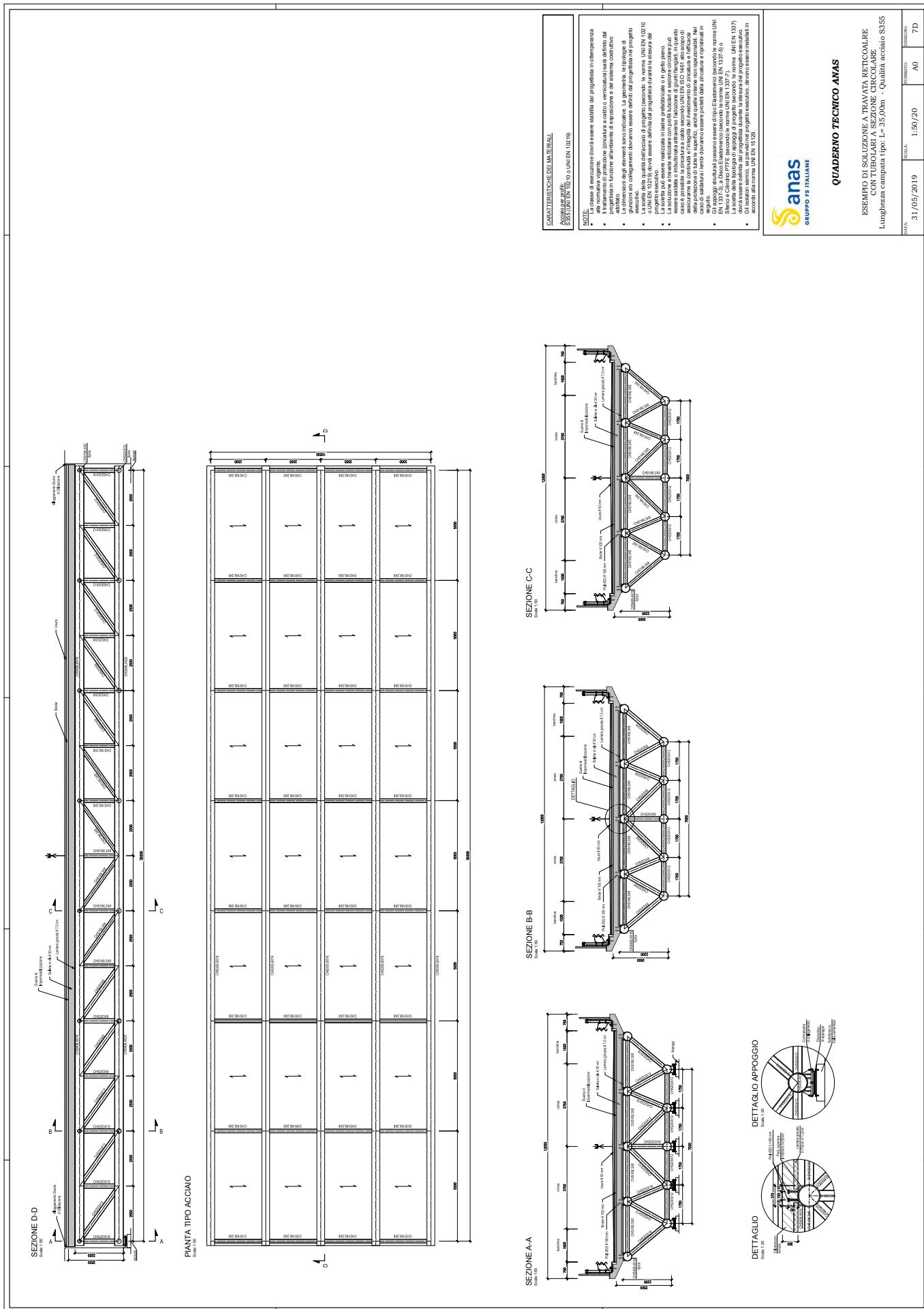


TAVOLA 7E

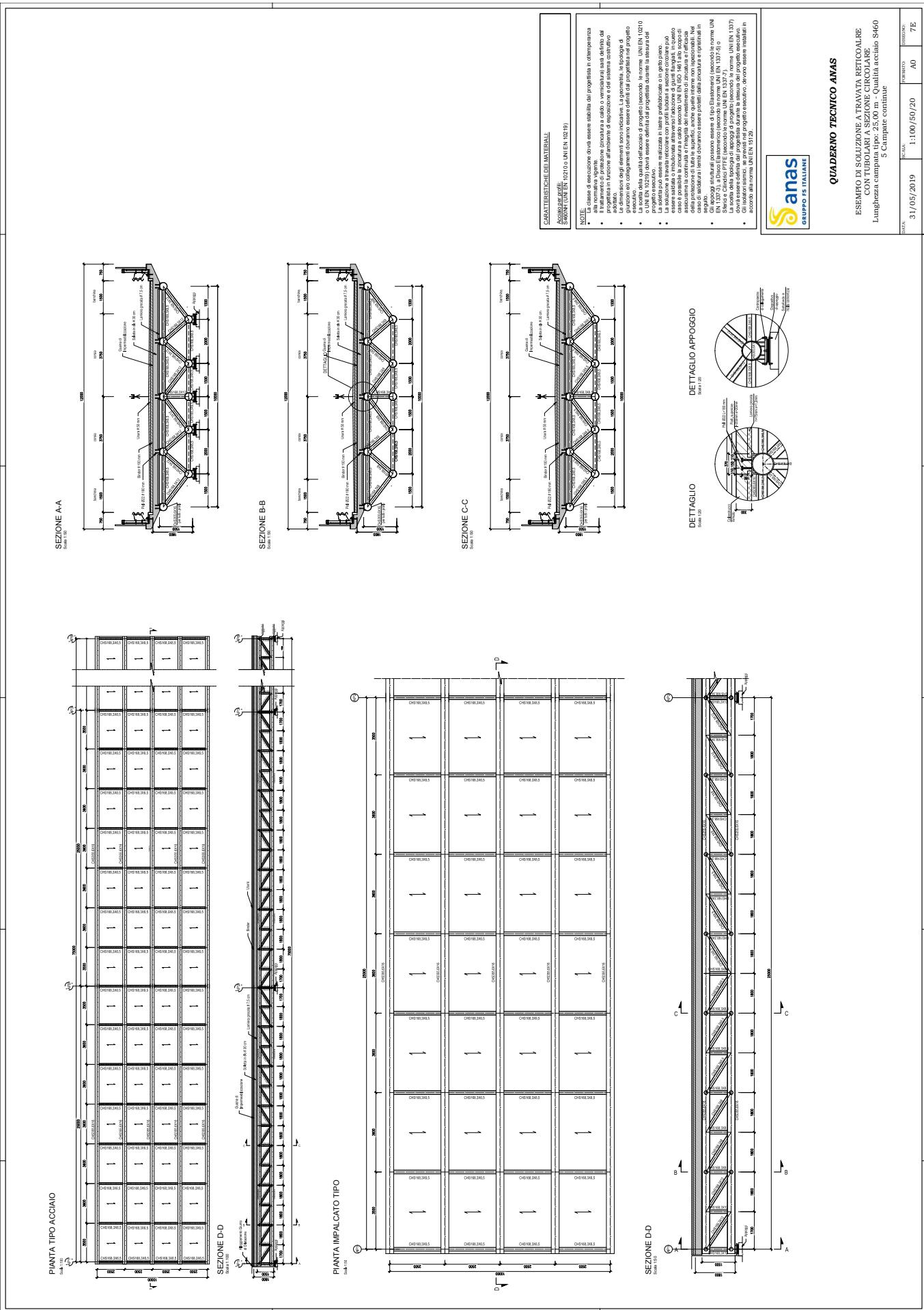
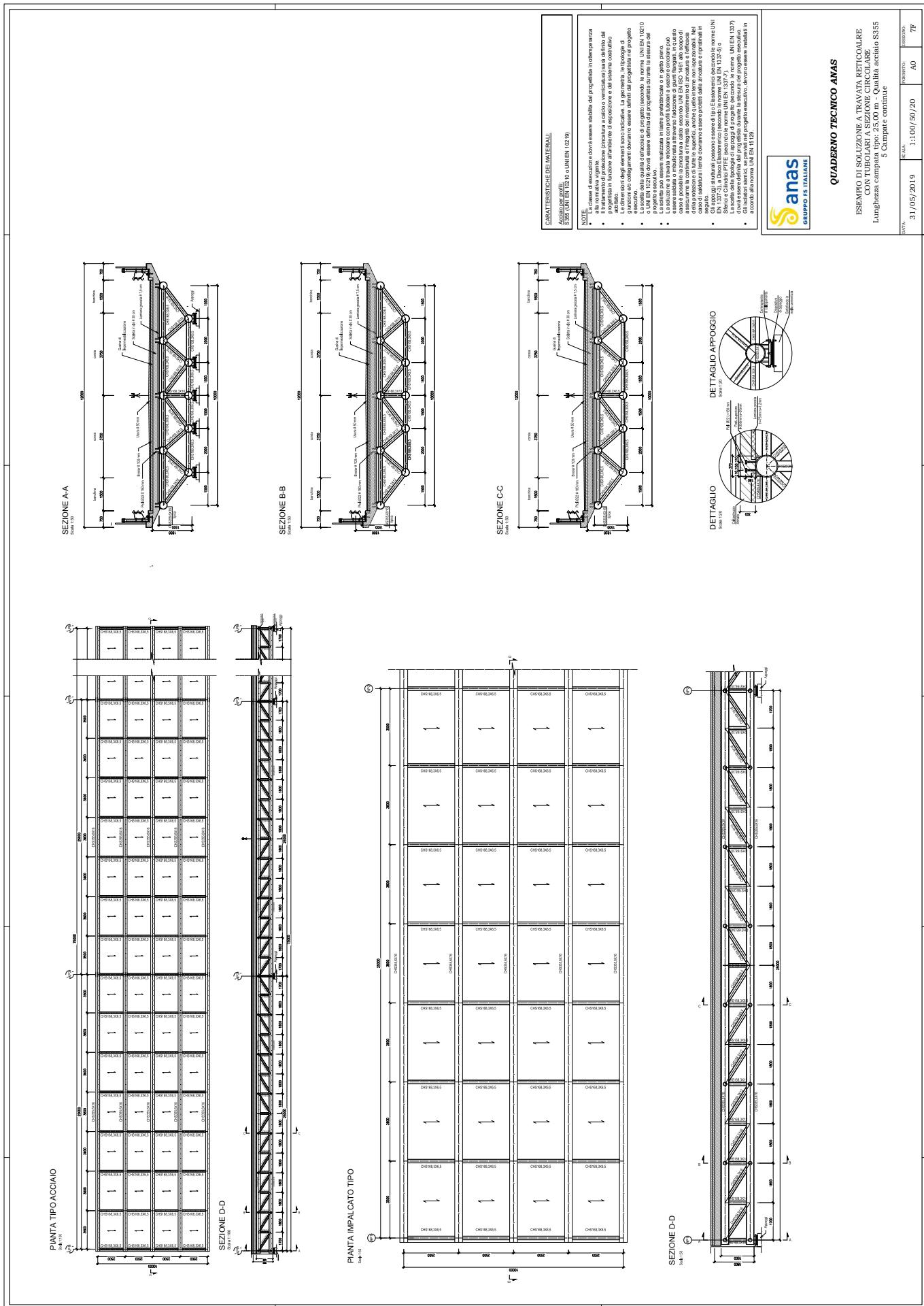


TAVOLA 7F



Riferimenti Bibliografici

- [1] UNI EN 10020:2001, Definizione e classificazione dei tipi di acciaio.
- [2] UNI EN 10027-1:2016, Sistemi di designazione degli acciai - Parte 1: Designazione simbolica.
- [3] UNI EN 10027-2:2015, Sistemi di designazione degli acciai - Parte 2: Designazione numerica.
- [4] UNI EN 10025-1÷5:2005, Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali
 - Parte 1: Condizioni tecniche generali di fornitura
 - Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali.
 - Parte 3: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato/normalizzato laminato.
 - Parte 4: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine ottenuti mediante laminazione termo meccanica.
 - Parte 5: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica.
- [5] UNI EN 10210-1÷2:2006, Profilati cavi finiti a caldo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali
 - Parte 1: Condizioni tecniche di fornitura.
 - Parte 2: Tolleranze, dimensioni e caratteristiche del profilo.
- [6] UNI EN 10219-1÷2:2006, Profilati cavi saldati formati a freddo per impieghi strutturali di acciai non legati e a grano fine
 - Parte 1: Condizioni tecniche di fornitura.
 - Parte 2: Tolleranze, dimensioni e caratteristiche del profilo.
- [7] UNI EN ISO 9223-1÷2:2012, Corrosione dei metalli e loro leghe.
 - Parte 1: Corrosività di atmosfere.
 - Parte 2: Classificazione, determinazione e valutazione.
- [8] UNI EN ISO 9227:2017, Prove di corrosione in atmosfere artificiali - Prove in nebbia salina.
- [9] UNI EN ISO 14713-1:2017, Rivestimenti di zinco - Linee guida e raccomandazioni per la protezione contro la corrosione di strutture di acciaio e di materiali ferrosi.
- [10] UNI EN ISO 14713-2:2010, Rivestimenti di zinco - Linee guida e raccomandazioni per la protezione contro la corrosione di strutture di acciaio e di materiali ferrosi - Parte 2: Rivestimenti di zincatura per immersione a caldo.
- [11] UNI EN 13438:2013, Pitture e vernici - Rivestimenti con polveri organiche per prodotti zincati con immersione a caldo o sherardizzati utilizzati nelle costruzioni.
- [12] UNI EN ISO 1461:2009, Rivestimenti di zincatura per immersione a caldo su prodotti finiti ferrosi e articoli di acciaio.
- [13] UNI EN ISO 10684:2005, Elementi di collegamento - Rivestimenti di zinco per immersione a caldo.

[14] ISO 965-1:2013, General purpose metric screw threads - Part 1: Tolerances Principles and basic data.

[15] UNI EN 14399-3÷4:2015, Assiemi di bulloneria strutturale ad alta resistenza da precarico.

- Parte 3: Sistema HR - Assiemi vite e dado esagonali.
- Parte 4: Sistema HV - Assiemi vite e dado esagonali

[16] UNI EN ISO 15048-1:2016, Assiemi di bulloneria strutturale non da precarico.

- Parte 1: Requisiti generali.

[17] UNI EN ISO 898-1:2013/2:2012/3:2018, Caratteristiche meccaniche degli elementi di collegamento di acciaio.

- Parte 1: Viti e viti prigioniere con classi di resistenza specificate.
- Parte 2: Filettature a passo grosso e a passo fine.
- Parte 3: Dadi con classi di resistenza specificate.

[18] UNI EN 14919:2015, Spruzzatura termica - Fili, barre, cavi per spruzzatura ad arco e a fiamma - Classificazione - Condizioni tecniche di fornitura.

[19] UNI EN ISO 2063:2017, Spruzzatura termica - Zinco, alluminio e loro leghe.

[20] UNI EN ISO 9224:2012, Corrosione dei metalli e loro leghe - Corrosività di atmosfere - Valori guida per le classi di corrosività.

[21] UNI EN ISO 14024:2018, Etichette e dichiarazioni ambientali - Etichettatura ambientale di Tipo I-Principi e procedure.

[22] UNI EN ISO 14021:2016, Etichette e dichiarazioni ambientali-Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II)

[23] UNI EN ISO 14025:2010, Etichette e dichiarazioni ambientali-Dichiarazioni ambientali di Tipo III-Principi e procedure.

[24] D.M. 17/01/2018, Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni".

[25] CIRCOLARE 21 gennaio 2019 , n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" » di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

[26] UNI EN 1090-2:2018, Esecuzione di strutture di acciaio e di alluminio - Parte 2: Requisiti tecnici per strutture di acciaio.

[27] UNI EN 1993-1-4:2015, Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-4: Regole generali - Regole supplementari per acciai inossidabili.

[28] UNI EN ISO 2808:2007, Pitture e vernici - Determinazione dello spessore del film.

[29] UNI EN ISO 3506-1÷4:2010, Caratteristiche meccaniche degli elementi di collegamento di acciaio inossidabile resistente alla corrosione.

- Parte 1: Viti e viti prigioniere.
- Parte 2: Dadi.
- Parte 3: Viti senza testa e particolari simili non soggetti a trazione.
- Parte 4: Viti autofilettanti.

[30] UNI EN ISO 12944-1÷5:2018, Pitture e vernici - Protezione dalla corrosione di strutture di acciaio mediante verniciatura.

-Parte 1: Introduzione generale.

- Parte 2: Classificazione degli ambienti.

- Parte 3: Considerazioni sulla progettazione.

- Parte 4: Tipi di superficie e loro preparazione.

- Parte 5: Sistemi di verniciatura protettiva.

[31] UNI EN 4624:2016, Pitture e vernici – Test di trazione (pull-off test) per adesione.

[32] UNI EN ISO 2409:2013, Pitture e vernici - Prova di quadrettatura.

[33] UNI EN 10088-4÷5:2009, Acciai inossidabili.

- Parte 4: Condizioni tecniche di fornitura dei fogli, delle lamiere e dei nastri di acciaio resistente alla corrosione per impieghi nelle costruzioni.

- Parte 5: Condizioni tecniche di fornitura delle barre, vergelle, filo, profilati e prodotti trasformati a freddo di acciaio resistente alla corrosione per impieghi nelle costruzioni.

[34] UNI EN 15773:2018, Applicazione industriale di rivestimenti organici a polveri su articoli di acciaio zincato a caldo o sherardizzato (sistemi duplex) - Specifiche, raccomandazioni e linee guida.

[35] UNI EN 1337-2÷7:2004, Appoggi strutturali.

- Parte 2: Elementi di scorrimento.

- Parte 7: Appoggi sferici e cilindrici di PTFE .

[36] UNI EN 1337-3÷5:2005, Appoggi strutturali.

- Parte 3: Appoggi elastomerici.

- Parte 5: Appoggi a disco elastomerico.

[37] UNI EN ISO 14040:2006, Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.

[38] UNI EN ISO 14044:2018, Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.

[39] UNI EN 15129:2018, Dispositivi antisismici.

[40] Ricciolino C., Cecchini M. e Pernice L., Manuale di buone pratiche per la zincatura a caldo, Associazione Italiana Zincatura, Mirapromotion Srl, Roma.

[41] Sustainable Bridges Workshops (2007), "Workshop - Load and Resistance Assessments of Railway Bridges" and "Guideline for load and resistance assessment of existing European railway bridges"-Jensen, Jens & Casas, Joan & Karoumi, Raid & Plos, Mario & Cremona, Christian & Melbourne, Clive-(2008).

Una pubblicazione di:



In collaborazione con:



Stampa: Settembre 2019

In copertina: Ponte delle Marmore - Strada Statale 79 bis Ternana ©ANAS

"Questo settimo quaderno tecnico è dedicato agli interventi di manutenzione degli impalcati metallici dei ponti in gestione Anas e ai casi in cui gli impalcati esistenti in calcestruzzo si trovano in condizioni di degrado tali da rendere antieconomica la loro riparazione e più vantaggiosa la loro sostituzione con impalcati in carpenteria metallica, valorizzando e rinnovando il patrimonio esistente. Anas si pone così all'avanguardia nella standardizzazione di interventi manutentivi complessi, con l'obiettivo che il lavoro svolto risulti utile anche a tutti i gestori di infrastrutture stradali a livello nazionale".

Massimo Simonini
Amministratore Delegato Anas

Anas S.p.A. (Gruppo FS Italiane)
Direzione Generale
Via Monzambano, 10 - 00185 Roma
Tel. 800841148
servizioclienti@stradeanas.it