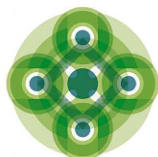




Comune di Bologna



Sostenibilità  
è Bologna



**PUMS**  
BOLOGNA  
METROPOLITANA

RTI Progettisti:



## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DELLA PRIMA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (LINEA ROSSA)



Fondo per lo Sviluppo  
e la Coesione

Intervento finanziato con risorse  
FSC 2014-2020 – Piano operativo della Città  
metropolitana di Bologna  
Delibera CIPE n.75/2017



### Armamento

## Relazione tecnica sui sistemi di armamento tranviario

COMUNE DI BOLOGNA  
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE

ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO

ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETERIA TECNICA

ING. BARBARA BARALDI

GEOM. AGNESE FERRO

RESPONSABILE DI COMMESSA

ING. PAOLO MARCHETTI

RESPONSABILE INTEGRAZIONE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

ING. SANTI CAMINITI

Gruppo di Progettazione:

Ing. Alessandro Piazza (Coordinatore Tecnico)  
Ing. Santi Caminiti (Progetto sistemi tranviari)  
Ing. Andrea Spinosa (Studi Trasportistici)  
Arch. Sebastiano Fulci De Sarno (Prog. Architettonico e Inser. Urbanistico)  
Ing. Sergio Di Nicola (Sovrastruttura Tranviaria)  
Ing. Jeremie Weiss (Impianti Tecnologici)  
Ing. Maurizio Falzea (Progettazione Funzionale Depositi)  
Ing. Pietro Caminiti (Viabilità Interferente)  
Ing. Stefano Tortella (Opere Strutturali)  
Ing. Andrea Carlucci (Esperto Impianti Eletto-ferroviari)  
Ing. Domenico D'Apollonio (Impianti di Trazione Elettrica)  
Ing. Francesco Azzarone (Impianti Meccanici)  
Arch. Sergio Moscheo (Prime Disposizioni per la Sicurezza)  
Ing. Boris. Rowenczyn (Piani Economici e Finanziari)  
Prof. Matteo Mattioli (Valutazione impatto ambientale e impatto acustico)

COMMESSA	FASE	DISCIPLINA	TIPO/NUMERO	REV.	SCALA	NOME FILE
B381	SF	ARM	RT001	A	—	B381-SF-ARM-RT001A.pdf

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	Dic. 2018	EMISSIONE	P. CAMINITI	FALZEA	S. CAMINITI
1					
2					

## Sommario

1. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO .....	3
2. PARAMETRI DI PROGETTO E DI ESERCIZIO .....	5
3. CONTENIMENTO DELLE VIBRAZIONI E DELLE CORRENTI VAGANTI .....	6
3.1 VIBRAZIONI .....	6
3.2 CORRENTI VAGANTI .....	9
3.3 RUMORE .....	11
4. CONFRONTO TRA I VARI SISTEMI DI ARMAMENTO .....	12
4.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA ERS (EMBEDDED RAIL SYSTEM) .....	12
4.2 SEZIONE TIPO L0 "LIVELLO 0" .....	14
4.3 SEZIONE TIPO L2 "LIVELLO 2" .....	16
4.4 SEZIONE TIPO L3 "LIVELLO 3" .....	18
5. FASI DI POSA ARMAMENTO CON SISTEMA ERS .....	20
6. DESCRIZIONE DELLE OPERAZIONI DI MANUTENZIONE .....	27
7. ASSEGNAZIONE DELLE SEZIONI TIPOLOGICHE DI ARMAMENTO SUL TRACCIATO BASE E SULLE VARIANTI PREVISTE NELLO STUDIO DI FATTIBILITÀ.....	28
8. MATERIALI, COMPONENTI ED ATTREZZATURE .....	29
8.1 ROTAIA .....	29
8.2 MATERASSINI ELASTOMERI .....	30
8.3 CALCESTRUZZI .....	32
8.4 SCAMBI E INCROCI .....	33
8.5 APPARECCHI DI DILATAZIONE .....	38



---

8.6	GIUNTI ISOLANTI .....	38
8.7	DRENAGGIO DEL BINARIO .....	38

## 1. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

---

L'oggetto del presente appalto è la redazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE) della prima linea tranviaria di Bologna (Linea Rossa), il cui percorso trae origine dal capolinea ovest situato a Borgo Panigale e si sviluppa lungo l'asse delle vie Marco Emilio Lepido e Aurelio Saffi fino al centro storico di Bologna; da qui prosegue verso nord in direzione della Stazione Bologna Centrale FS, del "Fiera District", del quartiere Pilastro, per giungere all'altro capolinea nei pressi del Polo Funzionale CAAB.

Il tracciato, lungo poco più di 15 km., a doppio binario, inizia a Borgo Panigale, nei pressi della connessione di Via Marco Emilio Lepido con la S.P. 568 "Persicetana" e si sviluppa quindi lungo un percorso sostanzialmente rettilineo su Via M.E. Lepido, Via Emilia Ponente, Via Aurelio Saffi ed un primo tratto di via San Felice.

Da via San Felice a Piazza XX Settembre si propongono due alternative di tracciato che investono il passaggio nella zona più centrale della città.

Alternativa 1: La ridotta sezione stradale di Via San Felice obbliga a proseguire disponendo i due binari su tracciati diversi, in dir. Est ancora su Via San Felice e in direzione opposta prima su Via delle Lame e poi su di Via Riva di Reno.

Quindi i due binari si ricongiungono e proseguono su via Ugo Bassi, fino a portarsi, con una curva a sinistra di 90° nei pressi di Piazza del Nettuno, su via Indipendenza, che viene percorsa interamente fino oltre Piazza XX Settembre.

Alternativa 2: questa seconda alternativa si sviluppa su Via Guglielmo Marconi, Via Giovanni Amendola e Viale Pietro Pietramellara.

Il binario dir. Est svolta a sinistra su Via G. Marconi alla fine di Via San Felice, mentre quello in dir. Ovest lascia Via G. Marconi svoltando a destra su Via Riva di Reno per percorrerla fino allo sbocco su Via San Felice.

Superata viale Pietramellara, il tracciato prosegue su Via Giacomo Matteotti, sovrapassando il fascio ferroviario nei pressi della stazione centrale, fino a raggiungere Piazza dell'Unità, svoltare a destra su Via della Liberazione e procedere poi su Viale Aldo Moro.

Da qui sono state ipotizzate due alternative di tracciato per raggiungere via San Donato, che si ricongiungono poco prima del sottopasso ferroviario della linea di cintura.

Alternativa 1: con l'intento di incrementare l'area di abitato servita senza invadere Piazza G. Spadolini, in corrispondenza dell'ingresso del Polo fieristico su Viale A. Moro, il tracciato viene fatto deviare sulla destra, lungo via Serena per raggiungere l'ampio Viale della Repubblica e procedere su tale arteria fino a svoltare a sinistra su Via San Donato.

Alternativa 2: nell'alternativa 2 invece il tracciato prosegue lungo viale Aldo Moro per poi girare sulla sinistra e occupare Viale delle Fiere in corrispondenza della rotatoria collocata all'intersezione delle suddette strade con via Garavaglia.

Dopo un primo tratto lungo viale della fiera di ca. 400 m, il tracciato devia sulla destra per occupare Via Edoardo Ferravilla al termine della quale, con una svolta a sinistra si immette su Via San Donato riprendendo il tracciato dell'alternativa "1" poco prima dei sottopassi in corrispondenza della linea ferroviaria.

Superata questa interferenza, il tracciato si sviluppa lungo via S. Donato, oltrepassando lo svincolo con la Tangenziale, in direzione nord.

Per raggiungere il capolinea est, sono previste le ultime due alternative di tracciato: la prima opta per un percorso che dall'intersezione con via Pirandello entra all'interno della zona del quartiere Pilastro; l'altra che rasenta a nord l'agglomerato abitativo fino a via Giuseppe Fanin.

Alternativa 1: in questa alternativa il tracciato lascia Via San Donato all'altezza di Via Luigi Pirandello, per percorrere un tratto di tale strada e quindi seguire il percorso più appropriato nelle strade del quartiere (Via Casini, via Frati, via Sighinolfi), raggiungere Via Larga e, percorrendo quest'ultima e via Arriguzzi, riconnettersi a Viale G. Fanin e raggiungere il capolinea.

Alternativa 2: il tracciato prosegue su viale della Fiera fino alla Rotonda Luchino Visconti, per poi inserirsi nei Viali Tito Carnacini e Giuseppe Fanin.

Qui si ricongiungono i tracciati previsti in entrambe le soluzioni fino al capolinea ubicato prima della Rotonda Giuseppe A. Torri, in area antistante il Polo Funzionale CAAB. La presente relazione ha per oggetto il sistema di armamento tranviario previsto per la linea Rossa della tranvia di Bologna.

La normativa di riferimento per la progettazione dell'armamento sono i Codici UIC (Internal Union of Railways), la normativa europea, le norme UNI e le norme ISO.

Oggetto dello studio dell'armamento sono: la fornitura e il posizionamento delle rotaie in linea sia protetta che promiscua (appoggi, profili in gomma, rotaie, saldature, giunti isolanti...) compresi tutti i materiali di fissaggio per tutti i tipi di posa realizzati, la fornitura e la posa degli scambi (eccetto i sistemi di manovra, i dispositivi di azionamento motorizzati e gli strumenti di controllo), la fornitura e la posa di materiali anti-vibranti ecc., il tutto sia in linea che in deposito.

## 2. PARAMETRI DI PROGETTO E DI ESERCIZIO

Per i parametri geometrici e di esercizio del progetto si è assunto quanto segue:

Parametri geometrici	Valore
Scartamento del binario in rettilineo e in curva: (punto di misurazione dello scartamento 14 mm sotto la superficie di rotolamento della rotaia 60R2)	1435 mm
Raggio minimo in linea:	20 m
Raggio minimo sul deviatoio:	25 m
Sopraelevazione in curva	Nessuna
Pendenza massima in linea	7%
Interasse dei binari in rettilineo con palificazione laterale	3300 mm

Parametri di esercizio	Valore
Velocità massima di esercizio	50 km/h

Velocità massima di progettazione	70 km/h
Valore massimo di accelerazione	1 m/s <sup>2</sup>
Valore massimo di decelerazione	1 m/s <sup>2</sup>
Valore massimo di accelerazione trasversale ammessa	1 m/s <sup>2</sup>
Valore massimo del contraccolpo	0,5 m/s <sup>2</sup>
Valore massimo di accelerazione verticale ammessa	0,5 m/s <sup>2</sup>

Nel presente progetto si è privilegiato un tracciato che assicuri il comfort del passeggero limitando al minimo l'accelerazione centrifuga (trasversale) avvertita dai viaggiatori e la sua variazione nel tempo (accelerazione longitudinale, contraccolpo ecc.).

### 3. CONTENIMENTO DELLE VIBRAZIONI E DELLE CORRENTI VAGANTI

Nella città di Bologna ed in particolare nel tratto interessato dalla Linea Rossa, che attraversa il centro della città, vi sono numerosi edifici storici (sensibili).

Pertanto, come avviene ormai in tutte le realizzazioni di trasporto pubblico di massa su rotaia, le vibrazioni propagate attraverso l'aria, il suolo e le strutture devono essere mitigate per ridurre il disturbo che si arreca sugli edifici limitrofi.

#### 3.1 VIBRAZIONI

La principale componente delle vibrazioni si trasmette attraverso il suolo mentre i rumori aerei che si propagano attraverso l'aria dipendono dal materiale rotabile e dalla finitura della superficie della sede.

La fonte delle vibrazioni è il risultato dell'interazione delle ruote con la rotaia e la loro trasmissione dipende da molti fattori quali, ad esempio:

- il tipo di fissaggio della rotaia alla sua sede;
- la piastra di appoggio della rotaia;
- i materassini antivibranti sotto il getto di calcestruzzo;

- eventuali cavità o i differenti gradi di compattazione del terreno di sedime;
- eventuali accorgimenti per lo smorzamento delle vibrazioni nelle opere civili;
- edifici con disposizioni antivibranti.

Le vibrazioni provenienti dal suolo, alla base di edifici sensibili, non dovrebbero superare i limiti fissati che vengono spesso normati mediante zonizzazioni specifiche. Tali valori dipenderanno dalla funzione dell'edificio e dalla sua distanza rispetto al binario.

Nei casi in cui tali valori dovessero superare i succitati limiti, a causa della sollecitazione creata dalla circolazione dei veicoli della linea tranviaria, si potrà installare un materassino di smorzamento, ove necessario, per ridurre fino a livelli accettabili le vibrazioni trasmesse dalle vetture.

Al momento non esiste nessuno standard a livello europeo che definisca esattamente i parametri di attenuazione delle vibrazioni dovute alla circolazione dei veicoli tranviari ma si fa usualmente riferimento per quanto possibile alle Norme UNI 9614 – Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo, UNI 9916 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, UNI 10570 - Prodotti per l'isolamento delle vibrazioni. Determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materassini e piastre, UNI 10985 – Vibrazioni su ponti e viadotti – Linee guida per l'esecuzione di prove e rilievi dinamici.

Normalmente si utilizzano differenti livelli di approfondimento in relazione al livello di progettazione per cui prima della esecuzione (progetto definitivo ed esecutivo) si potranno effettuare misurazioni in loco per determinare puntualmente i parametri di attenuazione in ogni sezione del tracciato. A livello di progetto di fattibilità tecnico-economica si possono assimilare le condizioni della linea in oggetto alle esperienze acquisite in altri progetti di diverse città europee, similari al contesto urbano attraversato nella città di Bologna.

Si potrà pertanto adottare un approccio personalizzato per ogni singola situazione, per determinare i requisiti dei livelli di attenuazione sui binari, in riferimento alla distanza tra edifici e binari, alla funzione dell'edificio ed alla sua sensibilità.

Qualsiasi edificio le cui fondamenta si trovino ad una distanza inferiore ai 12 metri dall'asse centrale del binario, richiederà delle speciali misure di attenuazione.



I risultati di questo primo approccio sono riportati sulle planimetrie con la indicazione delle tipologie di armamento tenendo conto dei seguenti fattori:

- tipo di terreno su cui insisterà il binario (geologia);
- posizione del binario rispetto alla sezione stradale (distanza tra asse e edifici);
- categoria di destinazione dell'area (residenziale, commerciale, industriale).

Poniamo che  $d_1$  sia definita come la distanza tra l'edificio di destra e l'asse del binario di destra e  $d_2$  sia definita come la distanza tra l'edificio di sinistra e l'asse del binario di sinistra;  $d_{min}$  risulterà essere la distanza inferiore tra  $d_1$  e  $d_2$ . Secondo tale criterio il tipo di smorzamento acustico del binario sarà stabilito tenendo anche in considerazione l'ambiente e la posizione dell'area.

L'attenuazione del binario verrà predisposta seguendo le seguenti regole:

- $d_{min} > 12m$ : livello 0
- $d_{min} > 12m$  ma in area sensibile: livello 2
- $7 < d_{min} < 12m$ : livello 2
- $7 < d_{min} < 12m$  ma in area sensibile: livello 3
- $d_{min} < 7m$ : livello 3
- Centro storico: livello 3

Con questi livelli si definiranno le relative sezioni dell'armamento.

Nei casi in cui il livello di vibrazioni in condizioni base sia ammissibile si installerà un binario di riferimento (Livello 0) che, in ogni caso consente una attenuazione di base rispetto ai sistemi massivi tradizionali. Nei casi in cui si richieda un livello medio di attenuazione si installerà un binario di riferimento con provvedimenti antivibranti (Livello 2). Nelle zone con sezioni particolarmente sensibili lungo la linea tranviaria, si installerà un binario di riferimento con provvedimenti antivibranti ad elevate prestazioni (Livello 3).

Queste sezioni potranno essere verificate attraverso un software di simulazioni che si rifà ai principi standard di massa-molla adattandoli al caso della linea tranviaria. Questo software consente di confrontare la filtrazione delle vibrazioni di un binario, ottenuta mediante l'inserimento in loco di materiali antivibranti (materassino elastomerico, piastrelle

sottorotaia, ecc.) messi in relazione con un binario standard cosiddetto «di riferimento» ovvero senza resilienti e materassino (livello 0).

La differenza tra il binario ammortizzato e il binario standard nel trasmettere le vibrazioni consente di ricavare la perdita d'inserzione in dB e quindi di valutare la performance dei dispositivi antivibrazioni proposti nel tipo di binario ammortizzato.

Le vibrazioni dovute alle sollecitazioni del tram sono, per lo più, localizzate nella gamma di frequenze (0-200Hz) per cui le soluzioni di attenuazione normalmente utilizzate sono di norma adottate proprio per ridurre le vibrazioni nella gamma tra (30-200Hz) in cui sono considerate le più importanti (specialmente 1/3 ottava (31,5-125Hz)).

Nelle successive fasi progettuali di dettaglio, le caratteristiche riguardanti il materiale rotabile che dovranno essere inserite per eseguire la simulazione saranno desunte da quelle di tram standard della lunghezza definita nel presente progetto di fattibilità.

Effettuata la scelta del sistema, oltre alle prove "Ante Operam", è oggi consolidato l'uso di effettuare un programma di monitoraggi da effettuare nel primo periodo di esercizio, atti a certificare il raffronto con l'attuale situazione e la rispondenza del sistema alla vigente normativa (la norma UNI 9614, per gli effetti delle vibrazioni in relazione ai fenomeni fisici indotti nella persona, la norma UNI 9916, per gli effetti delle vibrazioni indotte negli edifici, ed infine, per gli aspetti vibrazionali che afferiscono il fenomeno acustico, la Legge 26/10/1995, n. 447, e relativo Regolamento di Esecuzione emanato con D.P.R. 18/11/1998, n. 459).

### 3.2 CORRENTI VAGANTI

Oltre all'attenuazione delle vibrazioni ad un moderno sistema di armamento oggi è anche richiesta la protezione dalle correnti vaganti.

Relativamente all'isolamento elettrico delle rotaie utilizzate sia come mezzo di trasmissione dei segnali che di alimentazione di potenza risulta determinante evitare qualsiasi contatto con elementi di elevata conducibilità elettrica quali essenzialmente i metalli.

Come noto infatti nei sistemi ferrotranviari in cui le rotaie di corsa assolvano anche la funzione di conduttore di ritorno, le correnti disperse rappresentano un problema difficilmente

eliminabile con potenziale corrosione degli impianti stessi nonché delle strutture metalliche presenti in modo diffuso nel sottosuolo delle aree urbane.

Connesse all'esercizio tranviario sono inoltre da valutare le emissioni di campo elettromagnetico nell'intervallo 9kHz - 30MHz per il campo magnetico H (componente orizzontale) e 30MHz - 1 GHz per il campo elettrico E (componente verticale).

In conformità alle norme CEI EN 50121-2 (Emissioni dell'intero sistema ferroviario verso l'ambiente esterno), CEI 9-20/1 (Sistemi con tensione nominale di linea sino a 1500 V) CEI EN 50122-2 (Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane. Impianti fissi – Parte 2: protezione contro gli effetti delle correnti vaganti causate da sistemi di trazione a corrente continua) il binario dovrà essere elettricamente isolato rispetto alle correnti circolanti nella rotaia.

Per limitare al meglio i problemi connessi alla presenza di correnti elettromagnetiche risultano determinanti non solo gli elastomeri degli attacchi ed i profili di rivestimento delle rotaie ma anche l'eliminazione di ponti di elevata conduttanza elettrica tra le rotaie e tra queste e l'ambiente.

Nel fissaggio con componenti metallici delle singole rotaie alle traverse o alle platee e nella connessione tra le due rotaie si possono realizzare quelle situazioni che provocano sia cortocircuiti tra le rotaie che la dispersione di correnti di potenza all'ambiente.

L'isolamento del binario sarà garantito, a seconda della tipologia di armamento adottata, da:

- il sistema di fissaggio del binario, tale da garantire l'ancoraggio delle rotaie in modo continuo senza continuità elettrica con la base di calcestruzzo;
- i profili laterali in gomma lungo le rotaie con materiali a bassa resistenza, che attraverso loro forma e la posa isolino la rotaia del binario rispetto alla piattaforma in calcestruzzo e rispetto al piano di finitura con eventuale interposizione di pellicola isolante in aderenza alla rotaia nei casi in cui sia richiesto un isolamento più importante;

- collegamenti rotaia-rotaia e binario-binario ad intervalli regolari usando cavi isolati.
- utilizzo di giunti isolanti sulla rotaia che riducano la lunghezza dei circuiti di ritorno delle correnti di trazione.

Queste prestazioni sono condizionate dalla esecuzione a perfetta regola d'arte delle altre tecnologie che riguardano il binario, in particolare, per quanto riguarda i collegamenti equipotenziali, il tipo d'allacciamento elettrico, l'isolamento diretto delle parti riportate, le prestazioni del sistema di allontanamento delle acque meteoriche della sede (il che permetterà di evitare il ristagno e l'infiltrazione d'acqua attorno alla rotaia) e la realizzazione di una buona manutenzione del binario.

### 3.3 RUMORE

Il rumore è provocato dal contatto ruota/rotaia e dipende dal grado di ammaloramento dei binari e delle ruote.

Anche la rumorosità di tipo "solido" – regolamentata dalla Legge n. 447/1995 (Legge quadro sull'inquinamento acustico) e dai DPCM 01.03.91 (Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno) e DPCM 14.11.97 (Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore) - risulta soggetta agli stessi principi della vibrazione, per cui risultano determinanti gli elastomeri degli attacchi e della platea flottante.

Si debbono infatti limitare le eccitazioni locali della rotaia in corrispondenza degli organi di attacco per ridurre l'emissione acustica della stessa in particolare con le vibrazioni trasversali del gambo; allo stesso fine si utilizzano profili in gomma che la rivestono totalmente disaccoppiandola meccanicamente dall'ambiente.

Risulta necessario evidenziare come un sistema elastico di attacco delle rotaie, nel limite ovviamente della sicurezza della circolazione, risulti determinante nel ridurre la formazione di difettosità quali la mazzatura delle rotaie e la sfaccettatura delle ruote, origini prime di vibrazioni e rumori dannosi sia ai passeggeri che ai residenti. Proprio per tali difettosità si rendono necessarie le onerose operazioni di manutenzione (molatura) che limitano l'utilizzabilità della linea e dei mezzi in circolazione.

Anche il rumore derivante dal sottocassa della vettura può essere notevolmente ridotto all'occorrenza con i sistemi di finitura (specialmente il prato) grazie ai quali la rumorosità tende a diminuire sensibilmente.

#### 4. CONFRONTO TRA I VARI SISTEMI DI ARMAMENTO

Il **sistema** detto anche **ERS** (embedded rail system) prevede la posa di rotaie rivestite da profili in gomma che vengono posizionate mediante portalini e fissate in opera con un getto di bloccaggio. Tale sistema, largamente sviluppato in Europa (Parigi, Madrid, Bruxelles, Atene ecc.), è attualmente quello utilizzato in Italia per la realizzazione delle linee 2 e 3 di Firenze. Variando le caratteristiche delle gomme sottorotaia e dell'eventuale materassino sottoplatea il sistema consente una notevole gamma di soluzioni prestazionali. Le recenti applicazioni, quali per tutte quelle di Atene e Firenze, hanno consentito di perfezionare la posa migliorando la precisione nell'allineamento delle rotaie nonché alcuni dettagli costruttivi, rendendolo sicuro e affidabile.

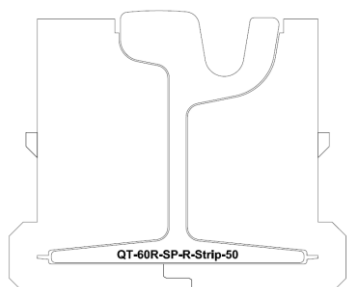
##### 4.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA ERS (EMBEDDED RAIL SYSTEM)

L'ERS è un sistema di binario isolato su appoggio continuo con elasticità omogenea senza fissaggio meccanico. Il rivestimento elastico delle rotaie consiste in profili realizzati in un elastomero granulare sinterizzato ad alta densità. Incastrato nella piastra di calcestruzzo superiore del binario, fino a una spessore libera di 100 mm sotto il Piano del Ferro per la posa del rivestimento, l'ERS garantisce la tenuta geometrica e meccanica della via (posizione e scartamento) senza sistemi di fissaggio.

Con il sistema a "rotaie rivestite", si provvede, mediante portalini metallici, al fissaggio ed alla calibrazione dei binari. L'allineamento del binario in orizzontale e verticale lungo gli assi X,Y,Z, viene realizzato prima di effettuare il getto di calcestruzzo nei vari strati. Lo strato finale di rivestimento può essere scelto in funzione delle esigenze architettoniche del contesto.

Per ogni tipo di rotaia (nel nostro caso la 60R2) viene realizzata su misura una specifica forma di profilo avvolgente, che assicura una trasmissione ottimale di carico verso la struttura portante. Il

principio è applicato soprattutto per binari interrati che utilizzano rotaie a gola in ambiente urbano con uso multi-modale (traffico tranviario ed altro).



La forma del rivestimento elastico è adatta al tipo di rotaia e garantisce:

- un trasferimento ottimale del carico;
- un isolamento vibro-acustico;
- un isolamento elettrico;
- un isolamento termico.

Le dimensioni e rigidità finali di profili di rivestimento in elastomero granulare saranno determinati sulla base delle prestazioni richieste per l'attenuazione delle vibrazioni.

Il sistema permette, grazie ad una striscia resiliente sotto rotaia e di una sagoma avvolgente elastomerica con differenti caratteristiche, la riduzione della trasmissione di vibrazioni all'ambiente con un fattore che varia approssimativamente da 7 a 15 dBV a seconda della richiesta.

Il coefficiente di attrito tra calcestruzzo e profilo in gomma dovrà essere minimo 0,6 e ciò è ottenibile grazie alla struttura aperta del profilo realizzato con granuli di gomma incollati con resina per cui il calcestruzzo entra nei pori e indurendosi garantisce l'aderenza richiesta.

Per rispettare le esigenze sulla propagazione delle correnti vaganti definite al livello del sistema, non si è prevista l'installazione di una guaina negli strati di calcestruzzo, ma piuttosto un isolamento efficiente alla base della rotaia. Considerando che le connessioni di continuità fra rotaia e rotaia e di segnaletica siano installate e collegate nelle norme dell'arte, l'ERS proposto per la linea rossa del tram di Bologna permetterà di ottenere le prestazioni richieste.

Prestazioni del Sistema ERS		
Parametro	Metodo di Prova	Valore
Densità	N.A.	900-1100 kg/m <sup>3</sup>
Rigidezza verticale statica	EN 13481-5 – Cat. A	80 kN/mm/lm
Rigidezza verticale dinamica @ 5 Hz	EN 13481-5 – Cat. A	110 kN/mm/lm



Resistenza longitudinale rotaia	EN 13481-5	Conforme (> 28,0 kN)
Resistenza alla fatica con carico inclinato	EN 13481-5	Conforme
Resistenza all'acqua, al gelo-disgelo, agli olii	RATP UV35	Conforme
Resistenza all'ozono	ISO 1431-1	Conforme
Resistenza al fuoco	ISO 11925-2	Classe E
Tossicità e opacità fumi	BS 6853	R = 2,14
Impatto ambientale	N.A.	≥ 90% riciclato 100% riciclabile
Resistenza elettrica rotaia / rotaia	EN 13481-5	≥ 5 kΩ
Protezione dalle correnti vaganti	EN 50122-2	≥ 2,0 Ω-km ≥ 20,0 Ω-km con apposita pellicola isolante

Nel caso di rivestimenti sensibili di tipo lastre o asfalto soggetti a forti sollecitazioni causate dal traffico (negli incroci stradali), potranno essere impiegati profili metallici contro il rivestimento elastico della rotaia per permettere l'accoppiamento della rotaia rispetto al rivestimento e aumentare in questo modo la tenuta d'insieme.

La forma e tipo del rivestimento elastico permettono di effettuare le operazioni di manutenzione e/o sostituzione della rotaia senza rompere i rivestimenti e le piastre di calcestruzzo.

#### 4.2 SEZIONE TIPO LO "LIVELLO 0"

La sezione tipo dell'armamento della tranvia definita L0 è composta da una rotaia incamicciata in profili avvolgenti in gomma che determinano un appoggio continuo elastico (definita con termine inglese "ERS/CRS Embedded Rail System / Continuous Rail System")

Il bloccaggio del binario avviene senza fissaggio meccanico, incastrando semplicemente le rotaie incamicciate in un getto di calcestruzzo, che a sua volta poggia su una piattaforma (piastra di

fondazione). Il tutto viene posato su un suolo eventualmente bonificato qualora la resistenza del terreno di sedime non rispondesse alle prescrizioni capitolari.

### Caratteristiche generali della Sezione tipo L0 Livello 0

- Dimensioni tipiche della sezione:
  - Larghezza: 2650 mm
  - Altezza totale della sezione: 750 mm
- Il sottofondo (terreno di sedime) dovrà avere un modulo di deformazione non inferiore a  $50\text{N/mm}^2$  (Mpa).
- La piastra di fondazione è costituita da una soletta armata con calcestruzzo avente con resistenza alla compressione  $R_{ck}$   $25\text{kN/mm}^2$ .
- Getto di bloccaggio del sistema ERS costituito da una piastra armata con calcestruzzo con resistenza alla compressione  $R_{ck}$  di  $35\text{kN/mm}^2$ :
  - Altezza: 300 mm
  - Larghezza nominale: 2650 mm
- Supporto delle rotaie: Sistema ERS. Supporto elastico continuo delle rotaie.
  - Rigidezza dinamica del supporto elastico continuo tra  $120\text{MN/m/mlr}$  e  $140\text{MN/m/mlr}$
  - Coefficiente dinamico del supporto elastico continuo: 1,3
- Profilo della rotaia: 60R2 (Inerzia  $I_{xx} = 3298.1\text{ cm}^4$ )

### Smorzamento Livello 0

Si assume che la sezione tipo L0 non abbia uno specifico smorzamento delle vibrazioni malgrado la gomma che riveste le rotaie dia comunque un certo contributo in tal senso. Eventualmente si volesse apprezzare comunque lo smorzamento che la gomma di rivestimento e di appoggio delle rotaie determinano nei confronti delle vibrazioni prodotte dal sistema, questo potrà essere determinato con modelli di calcolo in sede di progetto esecutivo. È comunque possibile variare



la rigidità della piastra sottorotaia ottenendo una gamma di prestazioni variabile che potrebbe essere affinata in fase di progettazione definitiva.

#### 4.3 SEZIONE TIPO L2 "LIVELLO 2"

A partire dalla sezione tipo L0 corrispondente al livello 0 di smorzamento semplicemente interponendo materiali resilienti tra la piastra di fondazione ed il getto di bloccaggio si determinano due sezioni ammortizzate con performance ordinate in base al grado di smorzamento richiesto:

- livello cosiddetto L2 «Livello 2» che corrisponde a uno smorzamento medio delle vibrazioni.
- livello cosiddetto L3 «Livello 3» che corrisponde a uno smorzamento elevato delle vibrazioni.

La sezione tipo L2 "Livello 2" si ottiene interponendo tra la piastra di fondazione ed il getto di bloccaggio un materassino elastomerico a medio smorzamento.

#### Caratteristiche generali della Sezione tipo L2 Livello 2

- Dimensioni tipiche della sezione:
  - Larghezza: 2650 mm
  - Altezza totale della soletta flottante: 779 mm (550 mm dal materassino alla rotaia)
- Il sottofondo (terreno di sedime) dovrà avere un modulo di deformazione non inferiore a  $50\text{N/mm}^2$  (Mpa).
- La piastra di fondazione è costituita da una soletta armata con calcestruzzo avente con resistenza alla compressione  $R_{ck} 25\text{kN/mm}^2$ .
- Caratteristiche della soletta "flottante":
  - Materassino elastomero (le caratteristiche del materassino elastomerico dovranno essere verificate nel progetto esecutivo).
  - Larghezza: 2650mm
  - Spessore: circa 25mm
  - Rigidità dinamica  $C_{dyn}$  = nella gamma dei  $30\text{MN/m}^3$

- Coefficiente di elasticità dei piastrini in gomma sottorotaia: 1,3
- Soletta di protezione del materassino in c.a. (cls con resistenza alla compressione Rck di 25kN/mm<sup>2</sup>) alta 150 mm e con larghezza nominale di 2650 mm
- Piastra di bloccaggio del sistema ERS in c.a. (cls con resistenza alla compressione Rck di 35kN/mm<sup>2</sup>)
- Pannelli laterali rigidi, ai lati della tranvia per isolare e separare i binari amortizzati
- Supporto delle rotaie: Sistema ERS Supporto elastico continuo delle rotaie.
- Rigidezza dinamica del supporto elastico continuo: tra 120MN/m/mlr e 140MN/m/mlr
- Coefficiente dinamico del supporto elastico continuo: 1,3
- Profilo della rotaia: 60R2 (Inerzia Ixx = 3298.1 cm<sup>4</sup>)

### Smorzamento ottenuto – “Livello 2”

L'efficienza dello smorzamento della sezione è stata stimata mediante simulazioni con massa-molla che confrontano la filtrazione delle vibrazioni del livello 2 con quella del binario standard cosiddetto «di riferimento».

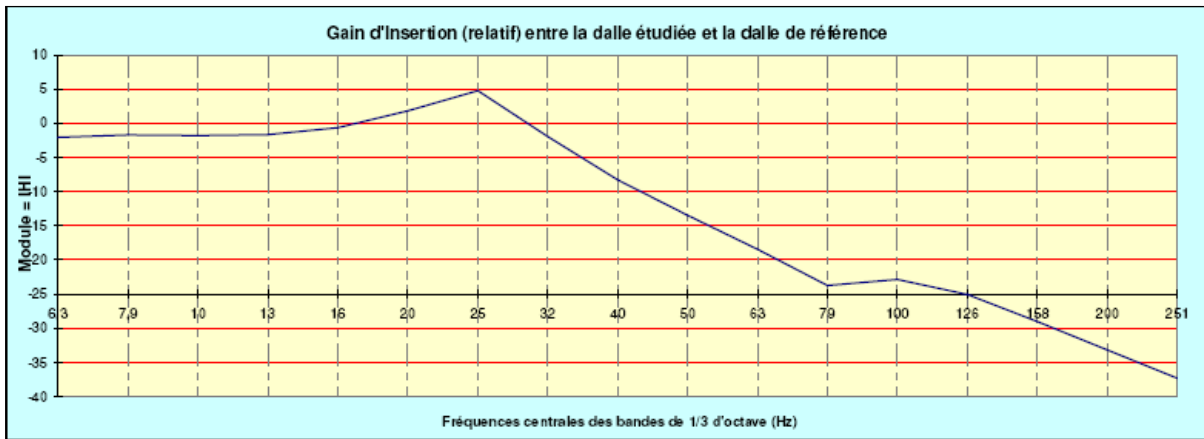
La sezione tipo “Livello 2” sarà utilizzata in aree in cui è richiesto un medio livello di attenuazione delle vibrazioni. Tale sistema si è rivelato ottimo in quelle sezioni tranviarie in cui la linea passa in centro città e la distanza tra gli edifici e la rotaia è contenuta tra 7 e 12m o in aree sensibili con distanza inferiore a 12 m.

La sezione proposta per il livello 2 presenta una frequenza propria di 25 Hz. La perdita d'inserzione è efficace oltre la soglia di 25 Hz e superiore a 10dB per tutta la gamma di frequenza al di sopra dei 45 hertz. – Nella gamma di frequenze 60-70 Hz si arriva a 17dB.

La sezione considerata presenta pertanto una media performance di smorzamento. L'elevata rigidità del sistema ERS/CRS è stata scelta in modo da limitare il guadagno d'inserzione positivo alla frequenza propria, mentre la bassa rigidità del materassino ha inteso ottenere un guadagno d'inserzione efficace.

Particolare attenzione è stata dedicata al guadagno d'inserzione nella gamma di frequenza tra 40 e 200 Hz in cui è più probabile che vari la frequenza propria degli edifici.

Il grafico riportato qui sotto indica il guadagno d'inserzione rispetto al binario di riferimento "Livello 0" per le frequenze [ 0-250Hz ].



Guadagno d'inserzione della sezione Tipo L2 "Livello 2" rispetto alla L0 "Livello 0"

#### 4.4 SEZIONE TIPO L3 "LIVELLO 3"

Il "Livello 3" è tipologicamente simile al "Livello 2". La sezione tipo L3 pertanto si distingue rispetto alla L2 per l'inserimento di un materassino elastomero più efficiente sotto la soletta di calcestruzzo del binario.

#### Caratteristiche generali della Sezione tipo L2 Livello 2

- Dimensioni tipiche della sezione:
  - Larghezza: 2650 mm
  - Altezza totale della soletta flottante: 750 mm (550 mm dal materassino alla rotaia)
- Il sottofondo (terreno di sedime) dovrà avere un modulo di deformazione non inferiore a  $50\text{N/mm}^2$  (Mpa).
- La piastra di fondazione è costituita da una soletta armata con calcestruzzo avente con resistenza alla compressione  $R_{ck} 25\text{kN/mm}^2$ .
- Caratteristiche della soletta "flottante":
  - Materassino elastomero (le caratteristiche del materassino elastomerico dovranno essere verificate nel progetto esecutivo).



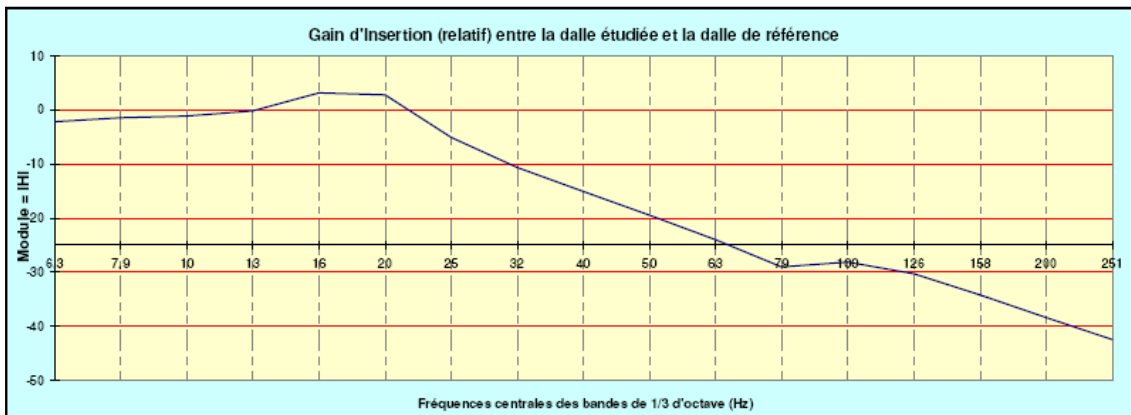
- Larghezza: 2650mm
- Spessore: circa 28mm
- Rigidità dinamica  $C_{dyn}$  = nella gamma dei 15MN/m<sup>3</sup>
- Coefficiente di elasticità dei piastri in gomma sottorotaia: 1,3
- Soletta di protezione del materassino in c.a. (cls con resistenza alla compressione  $R_{ck}$  di 25kN/mm<sup>2</sup>) alta 150 mm e con larghezza nominale di 2650 mm
- Piastra di bloccaggio del sistema ERS in c.a. (cls con resistenza alla compressione  $R_{ck}$  di 35kN/mm<sup>2</sup>)
- Pannelli laterali rigidi, ai lati della tranvia per isolare e separare i binari amortizzati
- Supporto delle rotaie: Sistema ERS Supporto elastico continuo delle rotaie.
- Rigidezza dinamica del supporto elastico continuo: tra 120MN/m/mlr e 140MN/m/mlr
- Coefficiente dinamico del supporto elastico continuo: 1,3
- Profilo della rotaia: 60R2 (Inerzia  $I_{xx}$  = 3298.1 cm<sup>4</sup>)

### Smorzamento ottenuto – “Livello 3”

L'efficienza dello smorzamento della sezione è stata stimata mediante simulazioni con massa-molla che confrontano la filtrazione delle vibrazioni del livello 3 con quella del binario standard cosiddetto «di riferimento».

La sezione tipo “Livello 3” sarà utilizzata in aree in cui è richiesto un alto livello di attenuazione delle vibrazioni. Tale sistema si è rivelato ottimo in quelle sezioni tranviarie in cui la linea passa in centro storico e/o la distanza tra edifici e binario è molto ridotta (aree sensibili e  $d < 7$  m).

Il grafico riportato qui sotto indica il guadagno d'inserzione rispetto al binario di riferimento “Livello 0” per le frequenze [ 0-250Hz ].



Guadagno d'inserzione della sezione Tipo "Livello 3" rispetto al "Livello 0"

La sezione proposta per il livello 3 presenta una frequenza propria di 15-20 Hz. Il guadagno d'inserzione è efficace oltre la soglia di 20 Hz e superiore a 15dB per tutta la gamma di frequenza al di sopra dei 40 hertz. – Nella gamma di frequenze 60-70 Hz si arriva a 23dB.

La sezione considerata presenta pertanto un'ottima performance di smorzamento.

L'elevata rigidità del sistema ERS/CRS è stata scelta in modo da limitare il guadagno d'inserzione positivo alla frequenza propria, mentre la bassa rigidità del materassino ha inteso ottenere un guadagno d'inserzione molto efficace.

Particolare attenzione è stata dedicata al guadagno d'inserzione nella gamma di frequenza tra 40 e 200 Hz in cui è più probabile che vari la frequenza propria degli edifici.

## 5. FASI DI POSA ARMAMENTO CON SISTEMA ERS

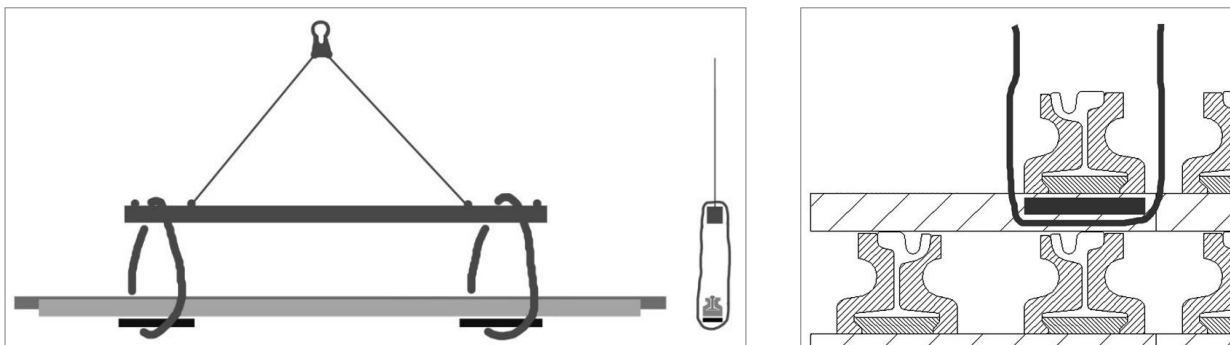
I lavori preventivi alle attività legate specificatamente all'armamento sono ovviamente analoghi a quelli degli altri sistemi di armamento più tradizionali, dalla recinzione del cantiere allo scavo della sede previo spostamento dei sottoservizi, alla eventuale bonifica del sottofondo con misto stabilizzato e/o cementato per migliorare le caratteristiche di portanza del terreno di sedime, sino alla realizzazione della soletta di fondazione di circa 20 cm.

Non appena il cantiere consente l'uscita degli operai delle opere civili e l'ingresso dei posatori del binario, iniziano le prime operazioni di stoccaggio delle rotaie lungo la linea e dell'approvvigionamento di tutti i materiali di prossimo impiego.

A secondo di come verranno organizzate le fasi di cantierizzazione, si provvederà alla disposizione delle rotaie sopra la soletta di fondazione e alla predisposizione delle infrastrutture per le opere tecnologiche (cavidotto, guaine, corrugati, pozzetti, griglie per la raccolta delle acque, ecc.).

### Incollaggio di rivestimenti elastici e posa delle rotaie

Prima dell'installazione i profili di rivestimento elastico sono incollati alle rotaie diritte e curve in un sito protetto e le estremità delle rotaie sono lasciate libere per una lunghezza minima (< 1200 mm) al fine di consentire le saldature.



I profili sagomati sono incollati lungo la rotaia al fine di evitare ogni contatto tra la rotaia stessa ed il materiale circostante (calcestruzzo). La sagoma di questi profili garantisce un fissaggio perfetto delle rotaie sul letto del binario in calcestruzzo. Questi elementi hanno anche la funzione di proteggere i binari stessi durante lo stoccaggio e le fasi di posa.

Il trasporto e la movimentazione delle rotaie già rivestite dovrà avvenire come rappresentato in figura, avendo cura di non danneggiare il rivestimento in gomma.

Successivamente alle operazione di saldatura la rotaia verrà rivestita in cantiere grazie a due moduli di profilo che verranno serrati alle rotaie per permettere di effettuare il getto.

### Saldatura delle rotaie



Le rotaie sono saldate testa a testa tramite saldature alluminotermiche da saldatori abilitati e qualificati.

Nelle foto si possono osservare le fasi delle operazioni di saldatura con procedimento alluminotermica.



### Montaggio e pre-regolazione del binario

Le rotaie assemblate sono dopo montate e fissate in portalini di posa distribuiti ogni 3,0 m che assicurano il livellamento ed allineamento X,Y,Z (posizionamento, scartamento, profilo longitudinale,...) partendo dalla quota del Piano del Ferro (PdF).



Gli assi del binario saranno tracciati partendo dalla poligonale di base secondo i punti caratteristici del tracciato definiti nel Progetto Esecutivo. Dopo aver realizzato questi due assi, dei punti intermedi consentiranno la regolazione planimetrica ed altimetrica dei binari. (4 m in curva e 20 m in rettilineo)

Le tolleranze di costruzione del binario e dei deviatori sono definite nella tabella sottostante:

Controlli	Tolleranze Binario
Scartamento (UNI 3648)	+/- 2 mm
Variazione di scartamento	1 mm/m
Allineamento verticale	+/- 10 mm
Variazione di allineamento verticale	1 mm/m
Allineamento orizzontale	+/-5 mm
Variazione di allineamento orizzontale	1 mm/m
Usando corde di 10m in curve di raggio > 200m Per le curve di raggio < 200m, usare il criterio dell'allineamento orizzontale	+/- 1 mm
Sopraelevazione	+/- 2 mm
Variazione di sopraelevazione	1 mm/m

I portalini sono dotati di due piastrine formate da due piatti metallici e da una cerniera, le rotaie sono attestate e fissate contro i due piatti metallici interni, in questo modo si ottiene lo scartamento di binario richiesto.

Quando è così fissata, la rotaia può essere alzata grazie alle due grandi barre filettate esterne. Una volta regolata la rotaia all'altezza corretta, le barre filettate orizzontali vengono sbloccate per lasciare scivolare l'insieme delle due rotaie verso la quota di regolazione laterale.

### Installazione delle armature , attrezzature secondarie altre tecnologie

Una volta effettuati il posizionamento e regolamento delle rotaie, si posano le armature del calcestruzzo e le attrezzature secondarie:



- guaine e riserve per cavi di alimentazione diverse: guaine di comando dei dispositivi, guaine per la segnalazione ferroviaria e stradale, guaine di ritorno trazione, ritorno di trazione, collegamenti rotaia-rotaia, binario-binario;
- canalette o semi-canalette di drenaggio, scatole di riscaldamento;
- cassero per forme di superficie (incisioni);
- altre predisposizioni impiantistiche.



### Cassero del binario e giunti di costruzione trasversali

Nello stesso tempo e secondo la situazione, sono eventuali installati casseri laterali e trasversali (giunti trasversali di costruzione) ai binari prima del getto di calcestruzzo.

I giunti trasversali di costruzione corrispondono alle giunti d'arresto del cantiere, alle interruzioni di fine giornata o nel caso di interruzioni abbastanza lunghe durante le quali il calcestruzzo rischia di cominciare a fare presa.

Tali giunti si trovano sotto il rivestimento all'altezza del calcestruzzo di posa dei binari e sono costruiti in polistirene denso o materiale simile. Il tracciato dei giunti è perpendicolare all'asse longitudinale. Sono distanziati al massimo ogni 30 metri di piattaforma.

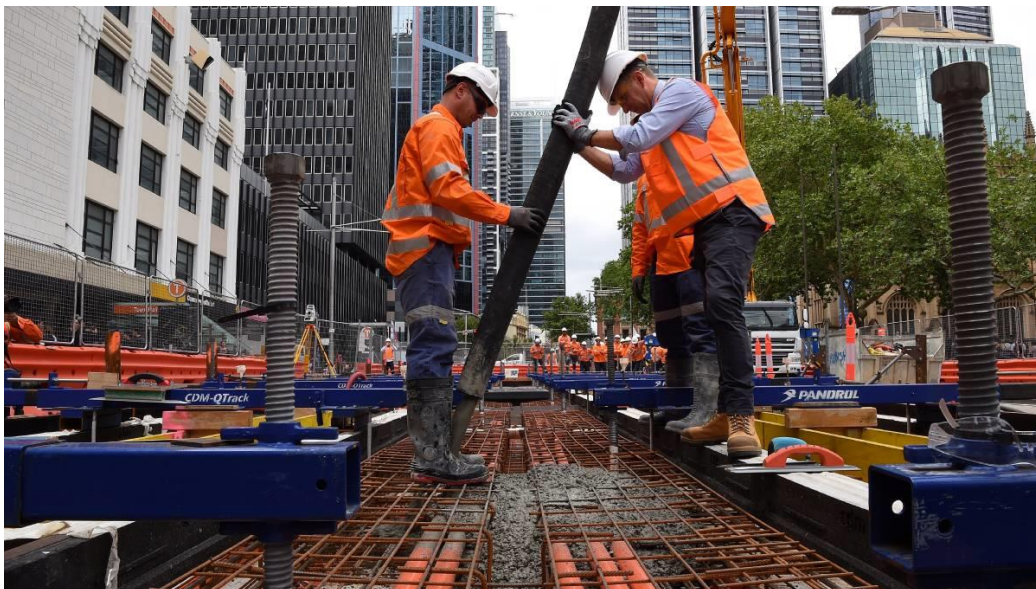


### Getto del calcestruzzo di bloccaggio

Il binario viene in seguito regolato in rispetto alle tolleranze di costruzione descritte nella tabella prima riportata e controllato prima che sia effettuato il getto di fissaggio.

Il calcestruzzo di bloccaggio C35/45 è poi gettato alla pompa o direttamente con canalette di scolo secondo le facilità di accesso. Durante questa operazione esso sarà sottoposto a vibrazioni; in seguito, un prodotto di rifinitura sarà vaporizzato sulla superficie del calcestruzzo colato.

In questo modo, la rotaia nonché le protezioni degli attacchi saranno protette.



### Rimozione degli elementi di regolazione

Il giorno successivo il getto del calcestruzzo può essere effettuata la rimozione dei portalini e elementi di cassero. I vari elementi saranno riuniti e sgomberati. Questi materiali saranno poi puliti e ricondizionati per un nuovo utilizzo.

Una volta che la piattaforma è liberata, viene realizzata la finitura e pulizia del binario.

### Controllo successivo il betonaggio e rifiniture

In seguito al betonaggio, sarà effettuato un controllo della posizione del binario e dell'impianto delle attrezzature. Contemporaneamente, avranno luogo le operazioni di rifinitura e pulizia del binario. Gli eventuali depositi di calcestruzzo saranno eliminati durante questa operazione.

La finitura potrà essere effettuata indifferentemente con asfalto, pietre in blocchetti e/o in lastre e prato. Nella figura sottostante si nota il caso di finitura in blocchetti di cls, mancano le rifiniture in prossimità del ferro. Nella figura accanto si nota invece un dettaglio della griglia di raccolta delle acque di piattaforma bene inserita nel contesto della pavimentazione.



### Posa del binario su soletta flottante Tipo L2 e L3 (Livelli 2 e 3)

Il principio e la realizzazione del binario sono identici a quelli precedentemente descritti per il Tipo L0. La piastra flottante appoggiata è realizzata frapponendo tra la piastra di fondazione e il calcestruzzo del binario un materassino continuo di spessore e rigidità definiti sulla base dei prestazioni di attenuazione delle vibrazioni da ottenere.

L'isolamento vibratorio della piastra appoggiata elasticamente è realizzato lateralmente posizionando una placca di polistirene o di un materiale simile contro le polifore cavidotti.

Il materassino antivibrazione, posizionato sia in verticale che in orizzontale, potrà essere separato dal successivo getto mediante un foglio di polietilene.

Al fine di proteggere il materassino antivibrazione durante le operazioni di consegna, di montaggio e di posa del binario, sarà realizzato uno strato di calcestruzzo spesso 15 cm posto subito al di sopra dello strato resiliente. Solo dopo l'allineamento del binario si effettuerà il getto di fissaggio.

Nel caso di posa sul materassino, i giunti trasversali di dilatazione (delle piastre in calcestruzzo) sono posizionati ad intervalli regolari tra i 4 ed i 6 metri su tutta la lunghezza della piattaforma, creando così delle "piastre" di binari isolate ed indipendenti che potranno essere rimosse in caso di manutenzione del materassino stesso.

## 6. DESCRIZIONE DELLE OPERAZIONI DI MANUTENZIONE

Quando si ha la necessità di sostituire una rotaia (e questo avverrà solo in caso di uso prolungato ed impossibilità di provvedere mediante molatura o risagomatura della stessa), questa può essere sostituita tagliando il profilo in gomma mediante una sega circolare ed estraendo il blocco. Nel caso di sostituzione del materassino si provvederà a sezionare le rotaie per il tratto di binario interessato. Rimosse le rotaie e la finitura che caratterizzava il tratto oggetto di manutenzione si provvederà al sollevamento delle lastre definite dai giunti trasversali (generalmente lunghe 4/6 mt) tramite i golfari precedentemente annegati nel getto o mediante perni meccanici da inserire all'atto durante le lavorazioni.

Sollevata la lastra generalmente si procede alla sostituzione del materassino ed al nuovo getto della parte asportata, tuttavia si potrebbe reinserire la stessa lastra anche se con qualche difficoltà operativa.

In ogni caso interventi dell'ordine di 6/12 mt di binario potranno essere effettuati durante le interruzioni notturne per non limitare l'esercizio.

La sostituzione del materassino dovrebbe avvenire nell'arco di 20-30 anni, tuttavia in casi particolari (es. incroci con un numero elevatissimo di cicli di carico) potrebbe verificarsi un degrado più precoce.

Interventi atti a risolvere cedimenti differenziali, potrebbero essere risolti come nei casi precedenti senza intervenire preventivamente sulla rotaia.



## 7. ASSEGNAZIONE DELLE SEZIONI TIPOLOGICHE DI ARMAMENTO SUL TRACCIATO BASE E SULLE VARIANTI PREVISTE NELLO STUDIO DI FATTIBILITÀ

L'assegnazione è stata effettuata analizzando le planimetrie (distanza tra gli edifici e i binari), nonché studiando in situ le caratteristiche dell'ambiente urbano e architettonico prospiciente le tratte in cui si è diviso l'intervento.

In funzione delle diverse soluzioni del tracciato base sono state individuate le differenti lunghezze e tipologie di armamento (L0, L2 ed L3). Si sono differenziate le soluzioni di armamento proposte derivate essenzialmente dalla posizione del binario rispetto alla sezione stradale ed alla presenza di edifici sensibili.

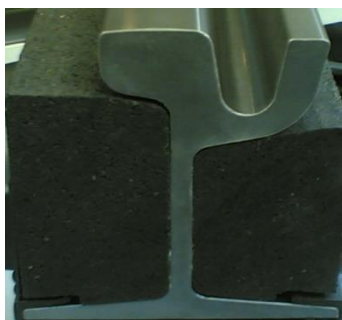
Pur non rappresentate negli elaborati di armamento tranviario sono state anche previste alcune comunicazioni semplici e doppie per consentire eventuali inversioni e/o marce degradate.

Per l'individuazione delle diverse tipologie di armamento nelle diverse tratte si rimanda agli elaborati grafici facenti parte del presente progetto (B381-SF-ARM-PP001\_003A).

## 8. MATERIALI, COMPONENTI ED ATTREZZATURE

### 8.1 ROTAIA

Il profilo di rotaia a gola in sezione corrente sarà in acciaio il 60R2 (Ri60-13) e dovrà essere conforme alle raccomandazioni della norma europea EN 14811:2006.



Il tipo di acciaio costituente la rotaia sarà definito in funzione della durata della ruota del materiale rotabile. Infatti, al fine di limitare le usure dei due elementi si raccomanda l'utilizzo di una rotaia che abbia una durezza equivalente a quella della ruota del materiale rotabile. La rotaia dovrà essere scelta, inoltre, in modo da facilitare le operazioni di manutenzione durante l'utilizzo.

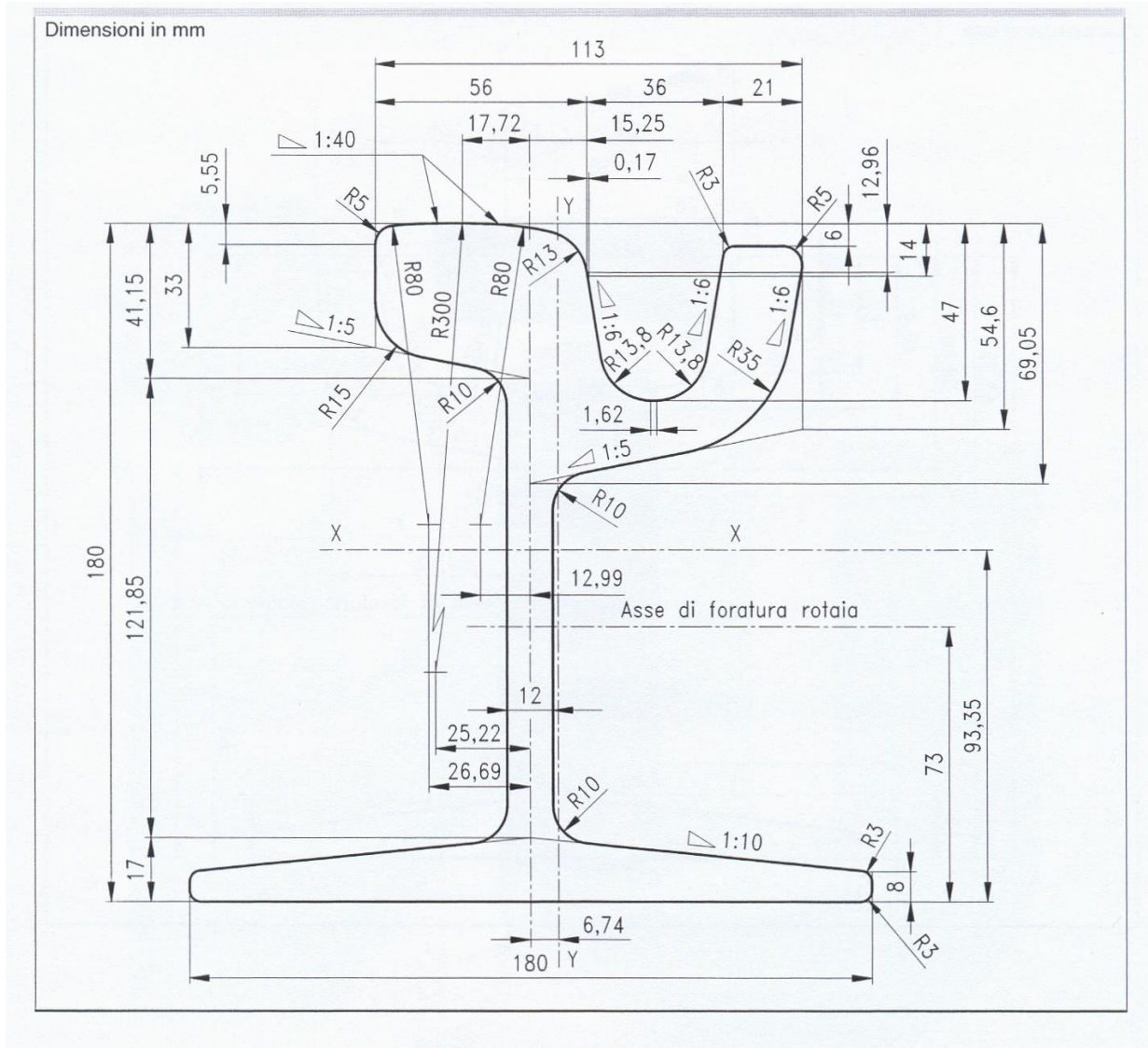
Secondo la norma EN 14811:2006 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Rotaie per impieghi speciali - Rotaie a gola e profili di costruzione associati, la qualità della rotaia deve essere R220G1 (equivalente alla resistenza alla trazione 780 Mpa, durezza compresa tra 220 e 260 HB).

A seconda delle necessità, la gola e l'anima della rotaia potranno essere forate in funzione dei sistemi di drenaggio e cablaggio utilizzati per il binario. Nel caso normale, le rotaie saranno fabbricate senza trattamenti supplementari né perforazioni dell'anima e della gola.

Le rotaie in curve e clotoidi di raggio inferiore a 150 m saranno curvate in sito protetto prima loro installazione sul cantiere.

Le rotaie in curve e clotoidi di raggio inferiore a 80 m dovranno essere trattate per ridurre l'usura e lo stridio al passaggio dei treni. Le rotaie saranno trattate durante loro produzione in fabbrica per aumentare la durezza della superficie di rotolamento della rotaia da 220 HB a 290HB.

Al fine di prevenire l'emissione di rumore del contatto ruota/rotaia al passaggio del tram le rotaie trattate antisura dovranno essere molate per ridurre la rugosità superficiale. La molatura consiste nella rimozione della calamina e della corrugazione permettendo di ottenere un profilo longitudinale ed una superficie del fungo della rotaia eccellenti.



## 8.2 MATERASSINI ELASTOMERI

I materassini antivibrazionali dei Livelli 2 e 3 saranno di tipo elastomerico con uno spessore inferiore a 40 mm dipendente dall'elasticità richiesta e dalla deflessione ammessa sotto la piastra

di calcestruzzo e saranno collocati tra il calcestruzzo di protezione (quando previsto) e la piastra di fondazione.

Le rigidità saranno determinate sulla base delle prestazioni richieste per l'attenuazione delle vibrazioni.

L'isolamento vibratorio orizzontale si otterrà interponendo un materiale analogo (ma con maggiore rigidità e minore spessore) tra il calcestruzzo della piastra su cui sono fissate le rotaie e i caviodotti laterali, al fine di assicurare la riduzione della propagazione delle onde.

I materassini antivibrazionali potranno essere rivestiti da uno foglio di protezione per garantirne la non alterazione durante il primo getto.

La massa costituita dal solettone (getto di secondo livello) di cui si è detto, in presenza dell'elastomero poliuretano, riduce le vibrazioni indotte, in maniera più consistente di quanto non avvenga solo a livello di fissaggio delle rotaie.

A minimizzare il disturbo vibrazionale – controllato da diverse normative quali la UNI 9614, UNI 9916 e UNI 10985 – risultano quindi determinanti tanto gli elastomeri utilizzati nei sistemi di ancoraggio delle rotaie quanto gli eventuali materassini interposti tra il binario ed il piano di appoggio nel funzionamento a platea flottante.

Il combinato effetto dei due livelli di elasticità – maggiore è la deformabilità migliore è la capacità di attenuare le vibrazioni – determina la capacità antivibrante del binario minimizzando il disturbo alle persone ed il potenziale danno alle strutture limitrofe in particolare se con elevata sensibilità quali gli edifici storici e monumentali.

Dipendendo dalla rigidità della fondazione, rispetto ad un sistema analogo isolato solamente con semplice gomma scanalata da 9 mm di spessore appoggiata su fondazione in CLS, questo sistema di isolamento assicura una perdita di inserzione di -20 dBV nella gamma predominante in frequenza compresa tra i 40 ed i 125 Hz. La deflessione della rotaia sotto i carichi statici (con treno a fermata) non deve essere maggiore di 3 mm.

Le rigidità possono essere ottenute anche variando gli spessori per cui potrebbe risultare economico e comodo nel caso di differenti livelli di prestazione (es. Livello S2 ed S3) non mettere



due materassini di differente spessore ma effettuare una sovrapposizione. In tal modo il singolo strato potrebbe essere utilizzato anche per le fasce verticali.

I materassini resilienti possono essere costituiti da granuli di gomma riciclata incorporati con resina ad elevata tecnologia manifatturiera per amalgamare una miscela di granuli di gomma di alta qualità e granulometria adeguata (risultato della macinazione di pneumatici usati di macchine e autocarri) con le resine e l'additivo.

I carichi ammissibili saranno costituiti da un carico permanente (250 mm RC + 160 mm strato di copertura in asfalto o terra a verde, equivalenti a circa 2.9 kPa) risulta essere di circa 10 kPa (0.010 MPa) ed un carico dinamico: carico di linea tranviaria 100 kN/asse con distanza tra 2 assi (ruote) di circa 2.00 metri - distanza tra carrelli = 7.00 metri, che rappresentano un valore compreso tra 10 ed i 15 kPa. Il range di carico per il materassino resiliente è compreso quindi tra 0.010 MPa <math>\leq</math> 0.020-0.025 MPa.

I materassini (di larghezza 800 mm in rotoli o fogli che seguono le specifiche richieste di progetto) dovranno essere stoccati su un pallet dotato di un foglio di protezione. I pallet non possono essere sovrapposti, né essere caricati da pesi supplementari e non possono essere sottoposti a condizioni climatiche estreme. Durante lo scarico dei pallet, si dovrà fare attenzione affinché questi non siano sottoposti ad urti violenti.

I pallet sono trasportati sulla zona di costruzione dall'autocarro. Sarà cura del posatore il controllo dell'aspetto dei pallet prima che si scarichino per verificare se le condizioni degli stessi siano corrette e non abbiano subito danni dovuti a fenomeni anomali (spostamento dei pallet, spostamento anomalo del materiale che ha lacerato il foglio di protezione ecc...). Anomalie eventuali dovranno essere riportate sulla bolla di consegna presentata dal trasportatore. Sarà cura della DL rifiutare eventuali pallet in condizioni non ottimali o con gravi anomalie.

### 8.3 CALCESTRUZZI

I calcestruzzi che verranno utilizzati per i differenti strati del pacchetto di armamento dovranno essere conformi alla norma UNI EN 206-1: 2001 "Calcestruzzo- Specificazione, prestazione, produzione e conformità" e le istruzioni complementari della norma UNI

11104:2004 per l'applicazione della norma EN 206-1. Ovviamente le strutture essendo armate saranno soggette alla 1086/71 e quindi ai prelievi di controllo prescritti dalla norma.

Sulle sezioni di binario con materassini antivibrazionali (Sezioni di livello 2 e 3) il calcestruzzo di bloccaggio C35/45 è realizzato dopo il getto di un primo strato di calcestruzzo C25/30 destinato a proteggere il materassino resiliente dalle manovre in cantiere.

L'altezza totale del calcestruzzo sopra il materassino è solitamente di 450 mm di cui:

- 150 mm di calcestruzzo di forma C25/30
- 300 mm di calcestruzzo di bloccaggio C35/45

Secondo il tipo di getto del calcestruzzo e/o secondo le condizioni climatiche, potrebbero essere utilizzati per compensare la contrazione volumetrica naturale del calcestruzzo additivi espansivi antiritiro.

#### 8.4 SCAMBI E INCROCI

Gli scambi saranno conformi alle norme VDV Oberbaurichtlinien und Oberbau-Zusatzrichtlinien für Bahnen.

Le caratteristiche generali degli scambi sono le seguenti:

- gli scambi ed incroci sono costruiti dalle rotaie a gola dello stesso profilo della rotaia attuale (60R2);
- conservazione totale della superficie di contatto ruota/rotaia;
- gli scambi sono inseriti nei tracciati senza sopraelevazione.

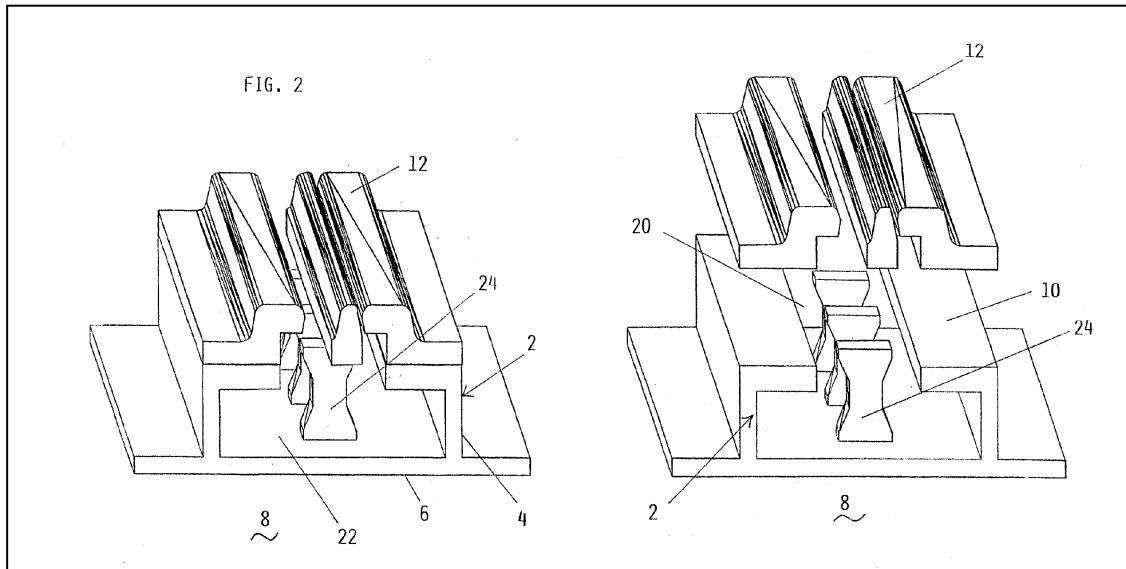
Le caratteristiche costruttive degli scambi sono strettamente legate alla tipologia di armamento adottata ed in genere ne seguono le caratteristiche fasi di realizzazione. E' sempre più frequente che negli scambi si prevedano serbatoi per la raccolta delle impurità e dei sedimenti per facilitarne la manutenzione.

Gli scambi sono composti da tre elementi distinti:

- casse scambio;
- cuore;
- cassette di manovra.

## Casse scambio

Gli scambi a lingue elastiche sono costituiti dall'assemblaggio di rotaie a gola con profilo speciale, nato appositamente per la realizzazione delle campate mobili dei deviatori tranviari.

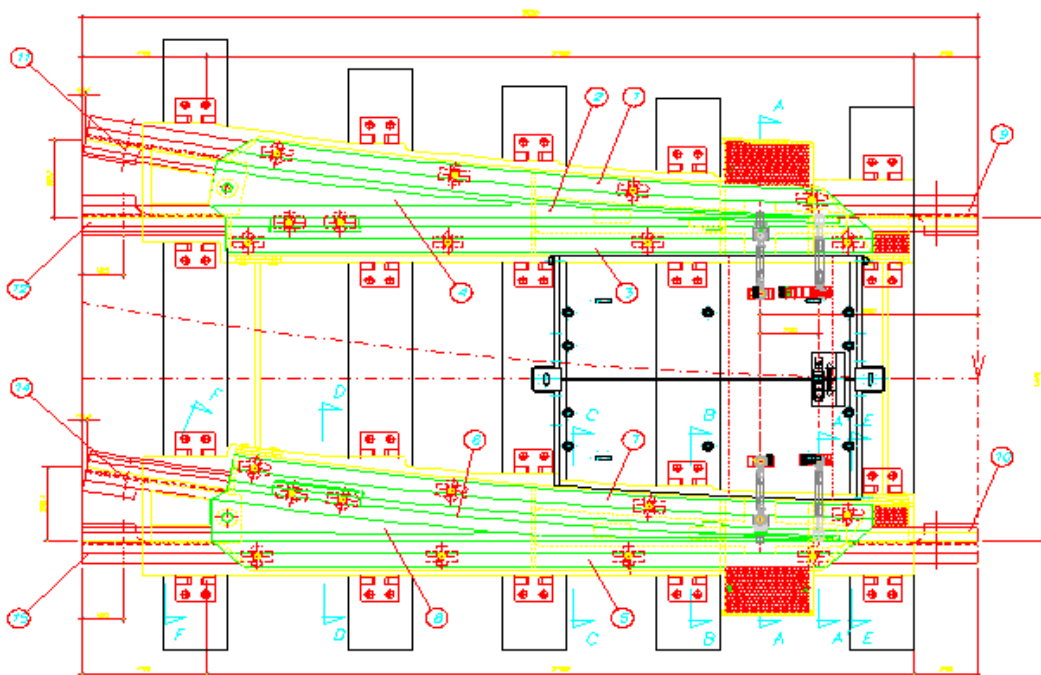


Il profilo B1, in acciaio A800 N/mm<sup>2</sup> (pos. 12) e in acciaio A900 N/mm<sup>2</sup> (ago mobile) assieme al piatto di scorrimento della lingua, in XAR400 (pos. 10), alla struttura di supporto in lamiera Fe 510 (pos. 2-4-6) di tipo scatolato per l'ancoraggio ed appoggio dei componenti di rotaia, che sono di facile sostituzione, e ai gambini di raccordo costruiti con rotaia Ir2 in acciaio A900 N/mm<sup>2</sup>, costituiscono la semicassa. Le lingue (aghi) possono anche essere fornite in acciaio fuso al manganese. L'ago scorre nella parte di maggior spostamento, su delle isole (pos. 24), in modo da permettere agli eventuali corpi estranei di cadere all'interno dello scatolato, che presenta in tale zona un vano denominato "serbatoio" (pos.22), senza depositarsi sul piano di scorrimento e quindi senza causare interferenze alla manovra dell'ago. (Vedi Fig. sopra).

La zona serbatoio può essere collegata alla rete fognante e può essere munita di impianto idrico per un veloce lavaggio. Accorgimenti questi che incidono in maniera notevole sia sul piano della sicurezza che della normale manutenzione. Le caratteristiche dei materiali componenti gli scambi consentono una buona saldabilità e compatibilità con le rotaie a gola impiegate nella tratta in progetto.

Lo scambio dovrà essere completo dei relativi organi di attacco (piastre Ri60 – piastre speciali - attacchi elastici Vosslo - piastre in gomma - chiavarde CK1 - caviglie 24M – ganasce, chiavarde e rondelle per le giunzioni)

Ciascuna semicassa sarà ottenuta tramite fresatura da un unico blocco (profilo CC379). Particolare cura sarà posta al piano di appoggio dell'ago che sarà completamente fresato onde ottenere un perfetto piano di appoggio. Gli aghi saranno di facile sostituzione senza alcun intervento sulla pavimentazione circostante e saranno realizzati in acciaio di qualità A900.



VISTA PLANIMETRICA DI UNO SCAMBIO

Cuore



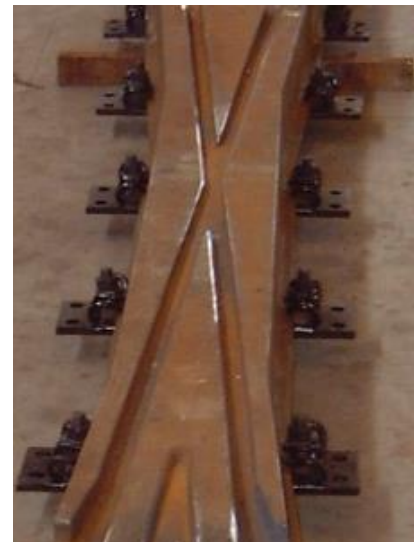
Il cuore (incrocio) tranviario dovrà realizzato con massello BL180-260, assemblato mediante saldatura alluminotermica con gambini in massello BL180-105 (vedi foto nel riquadro). Dette saldature dovranno essere sottoposte a scrupolosi controlli mediante ultrasuoni e magnetoscopi. I profili BL180-260 e BL180-105, in acciaio di qualità 880 N/mm<sup>2</sup>, verranno

opportunamente lavorati con asportazione di truciolo mediante frese a CNC. In alternativa, dovrà essere possibile utilizzare incroci di tipo monoblocco al manganese con percentuale compresa tra il 12 e il 14%. Il cuore dovrà essere completo dei relativi organi di attacco (piastre Ri60 – piastre speciali - attacchi elastici Vosslo - piastre in gomma - chiavarde CK1 - caviglie 24M – ganasce, chiavarde e rondelle per le giunzioni).

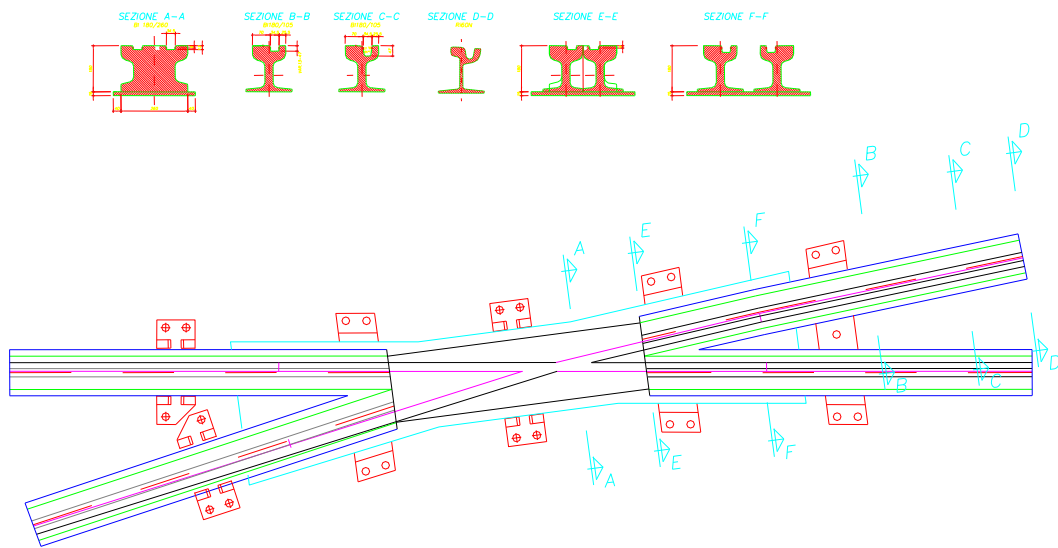
Al blocco centrale verranno saldati tramite saldature elettriche i gambini che saranno realizzati con rotaia R60.



VISTA DI INCROCIO TRANVIARIO IN FASE DI LAVORAZIONE (sinistra)



ESEMPIO DI INCROCIO TRANVIARIO FUSO AL MANGANESE (destra)



ESEMPIO DI DISEGNO COSTRUTTIVO CUORE TRANVIARIO

### Casse di manovra elettriche

Le cassette di manovra saranno tipo elettrico come da descrizione tecnica contenuta nel "Disciplinare tecnico scambi ed incroci" che sarà di corredo al progetto esecutivo.



CASSA DI SCAMBIO IN OFFICINA (Sinistra) ED IN OPERA (Destra)

## 8.5 APPARECCHI DI DILATAZIONE

Se necessario, i movimenti differenziali delle opere d'arte su cui passano i binari e la dilatazione delle rotaie dovranno essere assorbiti attraverso apparecchi di dilatazione. Gli apparecchi suddetti ovvieranno alla dilatazione dovuta alla temperatura, al ritiro, allo stiramento e allo spostamento della struttura causato dalla frenatura dei veicoli.

La corsa dell'apparecchiatura sarà compresa in una gamma compresa tra i 50 e i 100 mm. Le apparecchiature di dilatazione saranno previste sulle opere d'arte presenti lungo il tracciato consentendo la continuità del passaggio ed evitando shock tanto al binario quanto alle stesse strutture.

## 8.6 GIUNTI ISOLANTI

I giunti isolati eventualmente occorrenti saranno costruiti con ganasce, materiale isolante interposto fra le due teste delle rotaie e ogni altro elemento che risulti necessario per la realizzazione di un perfetto isolamento.

Il giunto normalmente sarà costituito da:

- due ganasce d'acciaio
- quattro chiavarde d'acciaio con dado e rosetta piana
- due ganasce di materiale isolante
- quattro canotti isolanti per chiavarde
- sagoma isolante di spessore 5mm.

La distanza a cui dovranno essere posti i giunti e la loro specifica tipologia potrà essere meglio definita in sede di progettazione esecutiva, una volta che le caratteristiche del binario risultino perfettamente definite.

## 8.7 DRENAGGIO DEL BINARIO

Normalmente il problema dello smaltimento delle cosiddette acque di piattaforma, e cioè delle acque meteoriche che si raccolgono all'interno della sede tranviaria costituisce un punto di difficile soluzione.

La sede infatti spesso non è complanare con la livelletta delle strade adiacenti per cui talvolta risulta impossibile eliminare le acque meteoriche attraverso i sistemi di smaltimento stradali esistenti. Nei tratti protetti inoltre di solito due dissuasori continui delimitano la sede determinando una zona idraulicamente isolata rispetto al resto del sistema stradale, con la sola eccezione dei tratti in promiscuo e degli incroci.

Si è pertanto determinata, seguendo l'esperienza degli interventi realizzati in altre città, la necessità di prevedere un sistema di smaltimento delle acque autonoma ed autosufficiente, eventualmente collegata ai collettori fognari ma con punti di captazione interni alla sede.



Il drenaggio del binario potrà essere assicurato attraverso canaline trasversali costruite in cemento fibrorinforzati coperte da griglie che raccolgano l'acqua dalla superficie della pavimentazione e quella dalle gole delle rotaie.

Si collegheranno all'altezza della finitura della pavimentazione ed avranno in genere larghezza pari a quella della sede del binario (2500 mm), e saranno raccordate ai collettori di drenaggio della sede ogni 25 m per nel caso di pavimentazione in erba e ogni impluvio del tracciato, e comunque per lunghezze non superiori a 200 m, nel caso di pavimentazione in asfalto, blocchetti o lastre di pietra.

L'esperienza suggerisce anche di risolvere il problema delle acque che si raccolgono internamente alla gola mediante opportuni accorgimenti che sono legati tanto al sistema costruttivo dell'armamento prescelto che alla tipologia di finitura adottata. Normalmente il





problema si risolve mediante forature interne alla gola che consentono alle acque ivi raccolte di defluire nei collettori principali mediante tubicini di collegamento. Tali soluzioni sono valide se garantite da un programma specifico di manutenzione che preveda la regolare e periodica pulitura della gola e degli apparati di smaltimento, altrimenti i residui che tendono ben presto ad accumularsi all'interno della gola stessa ne ridurrebbero drasticamente l'efficacia.