



Comune di Bologna



Sostenibilità
è Bologna



PUMS
BOLOGNA
METROPOLITANA

RTI Progettisti:

SYSTRA SOTECNI
SYSTRA GROUP



STUDIO MATTIOLI
Ambiente - Ingegneria - Energia



PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DELLA SECONDA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (TRATTO NORD LINEA VERDE - DIRETTRICE CORTICELLA-CASTEL MAGGIORE)

FSC

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



Elaborati generali Modello di esercizio e parco rotabili

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

Aech. VIRGINIA BORRELLO

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 Wajs (Impianti Tecnologici)
Ing. Maurizio Falzea (Esperto Armamento)
Ing. Giorgio Coletti (Progettazione Funzionale Depositi)
Ing. Pietro Caminiti (Viabilità Interferente)
Ing. Stefano Tortella (Opere Strutturali)
Ing. Andrea Carlucci (Esperto Impianti Elettro-ferroviari)
Ing. Domenico D'Apollonio (Impianti di Trazione Elettrica)
Ing. Matteo Mariotti (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-C	SF	ESE	RD001	B	—	B381-C-SF-ESE-RD001B

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	31-12-2018	EMISSIONE	SPINOSA	SPINOSA	S. CAMINITI
1	Lug. 2022	AGGIORNAMENTO PER ITER SCREENING AMBIENTALE	SPINOSA	SPINOSA	S. CAMINITI
2					

Indice della relazione

1. PREMESSA.....	2
2. DIMENSIONAMENTO DELLA VETTURA TIPO.....	2
3. PARAMETRI DI ESERCIZIO	3
3.1 DATI DI INPUT.....	3
3.1.1 TEMPO DI ARRESTO IN FERMATA	3
3.1.2 PERDITEMPO AGLI INCROCI SEMAFORIZZATI.....	3
3.2 ASSUNZIONI MODELLISTICHE	4
3.3 RELAZIONE TRA VELOCITÀ DI MARCIA, RAGGI DI CURVATURA E PENDENZA DELLA LIVELLETTA.....	4
4. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE	7

Indice delle tabelle

Tab. 1 – Parametri di esercizio della linea Piazza dei Martiri 1943-1945 – Castel Maggiore	7
Tab. 2 – Listato del programma di simulazione dell'esercizio.....	8

1. PREMESSA

La presente relazione riguarda il modello di esercizio della diramazione per Corticella, secondo ramo della rete tramviaria della Città di Bologna che collegherà il centro storico alla stazione SFM di Corticella e al nuovo centro di mobilità nord collocato presso il comune di Castel Maggiore.

2. DIMENSIONAMENTO DELLA VETTURA TIPO

Per la simulazione dell'esercizio si assume una vettura tramviaria ordinaria a pianale ribassato con le seguenti caratteristiche:

Tensione di alimentazione	750 Vcc
Possibilità di marcia autonoma (pacchi batterie)	Per almeno 1.500 metri a pieno carico
Larghezza veicolo	2.400 mm
Larghezza in corrispondenza del pianale	Fino a 2.500 mm con sporgenza rampe
Lunghezza cassa	30-35 metri
Altezza massima (pantografo al massimo)	6.400 mm
Altezza del pianale dal p.d.f. (100% pianale ribassato)	350 mm
Scartamento	1.435 mm
Massa e tara	UNI EN 11174
Posti totali	220 in condizioni ordinarie 240 in fascia di punta della domanda
Velocità massima	50 km/h
Accelerazione all'avviamento	Minimo 1,20 m/s ²
Decelerazione massima freno di servizio	Minimo 1,30 m/s ²
Pendenza massima superabile	Minimo 60‰
Raggio minimo percorribile in deposito	18 m
Raggio minimo percorribile in linea	22 m
Raggio minimo dei raccordi verticali concavi e convessi	300

3. PARAMETRI DI ESERCIZIO

3.1 DATI DI INPUT

3.1.1 *Tempo di arresto in fermata*

Il tempo di arresto nelle fermate è stato calcolato utilizzando la previsione dei saliti e discesi durante il servizio nell'ora di punta, dalle ore 7.30 alle 8.30. Per ogni direzione, alle fermate con meno di 100 saliti e discesi, è stato assegnato un tempo di permanenza "ridotto", pari a 20 secondi; alle fermate con un numero compreso tra 100 a 1.000 saliti e discesi è stato assegnato un tempo di permanenza "medio" di 30 secondi; alle fermate con più di 1.000 saliti e discesi è stato assegnato un tempo di sosta "grande" pari a 40 secondi.

3.1.2 *Perditempo agli incroci semaforizzati*

Le vetture operanti lungo la linea di progetto attraversano diversi incroci, che vengono utilizzati anche dagli utenti della strada. Il sistema di referenziazione proposto, già in vigore nella città di Bologna per il transito dei mezzi pubblici, assegna alle vetture tranviarie la priorità rispetto agli altri utenti della strada. Tuttavia, considerando la congestione e la complessità di alcune intersezioni, la lunghezza minima delle fasi semaforiche e il tempo necessario per liberare l'incrocio, è stato stimato che nel 25% dei casi il tram dovrà fermarsi: il tempo di attesa medio è stato fissato a 10 secondi.

8.2.1.1. *Tempo di inversione della vettura ai capolinea*

Una volta raggiunto il capolinea i tram invertiranno il verso di percorrenza tramite cambio banco del conducente e torneranno indietro. Il tempo d'inversione sarà pari a quello necessario per la manovra con cui il tram cambierà binario più i 90 secondi considerati perché il conducente cambi cabina.

Per ottimizzare il numero di tram utilizzati è stato deciso di costruire l'orario di servizio con la seguente metodologia:

- i tram che raggiungono il capolinea di Piazza dei Martini invertono la marcia e ripartono in direzione Castel Maggiore il più rapidamente possibile;

- I tram che raggiungono il capolinea Castel Maggiore attendono, prima di ripartire, il tempo necessario per inserirsi nella sezione centrale della linea tra i tram provenienti dal capolinea di Piazza dei Martiri in modo da garantire una frequenza pari a 5 minuti in ora di punta su tutta la sezione Piazza dell'Unità-Castel Maggiore.

3.2 ASSUNZIONI MODELLISTICHE

Sulla base di quanto esposto nel paragrafo precedente sono assunti i seguenti parametri di lavoro:

- Tempo medio di sosta minimo in fermata: 20 secondi;
- Attraversamenti stradali protetti da asservimento con attraversamento da parte del veicolo a una velocità non superiore a 30 km/h;
- Attraversamenti pedonali segnalati e protetti da semaforizzazione con avvisori acustici;
- Velocità massima possibile (in area urbana): 50 km/h;
- Fattore di accelerazione (e decelerazione): 1,0 m/s² a vuoto; 0,8 m/s² a pieno carico con pendenza inferiore al 25 per mille; 0,6 m/s² con pendenza compresa tra 25 e 50 per mille; 0,4 m/s² con pendenza superiore al 50 per mille.

La velocità è limitata a 15 km/h sulle comunicazioni.

3.3 RELAZIONE TRA VELOCITÀ DI MARCIA, RAGGI DI CURVATURA E PENDENZA DELLA LIVELLETTA

L'esame della letteratura e dei sistemi attualmente in esercizio ha permesso la stima di due importanti correlazioni tra velocità massima a pieno carico, raggio planimetrico e pendenza della livelletta.

Per quanto concerne il legame tra velocità massima e raggio planimetrico la correlazione (si veda la fig. 1) è la seguente:

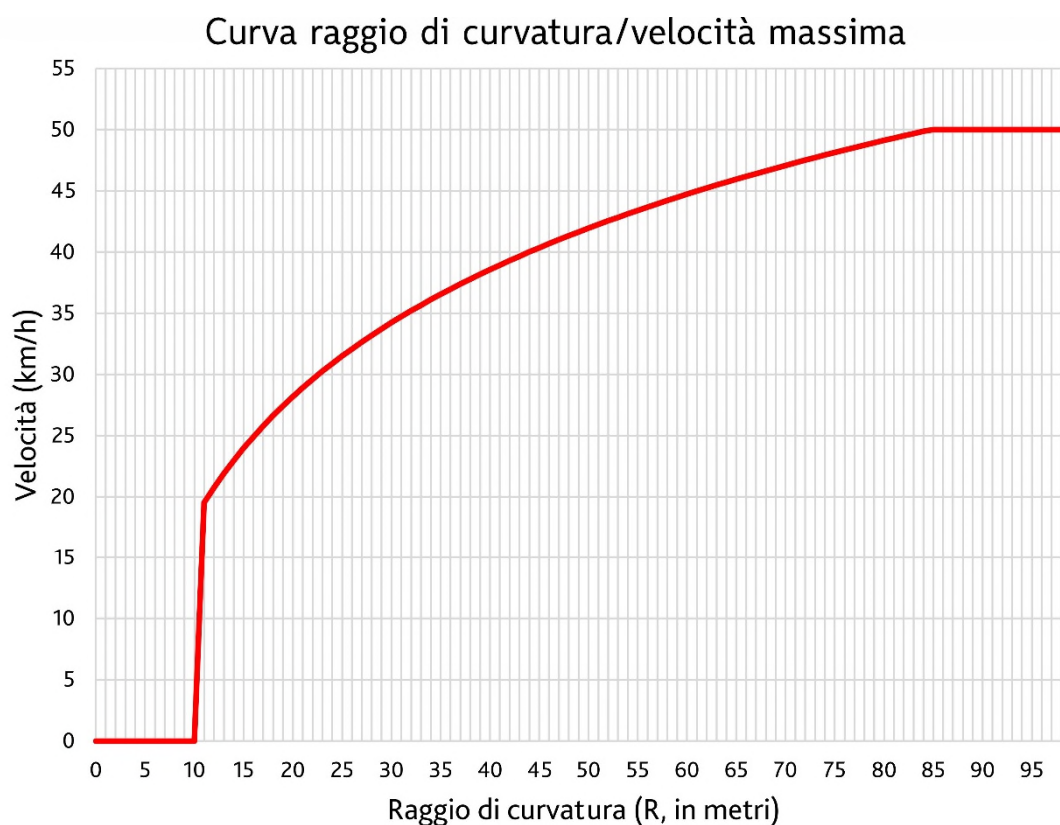
$$(1) \quad v_{MAX} = 15,5 \cdot \ln(2 \cdot R) - 19$$

Per quanto concerne il legame tra velocità massima e pendenza della livelletta la correlazione (si veda la fig. 2) è la seguente:

$$(2) \quad v_{MAX} = 54 - 18 \ln(100 \cdot p_{\%})$$

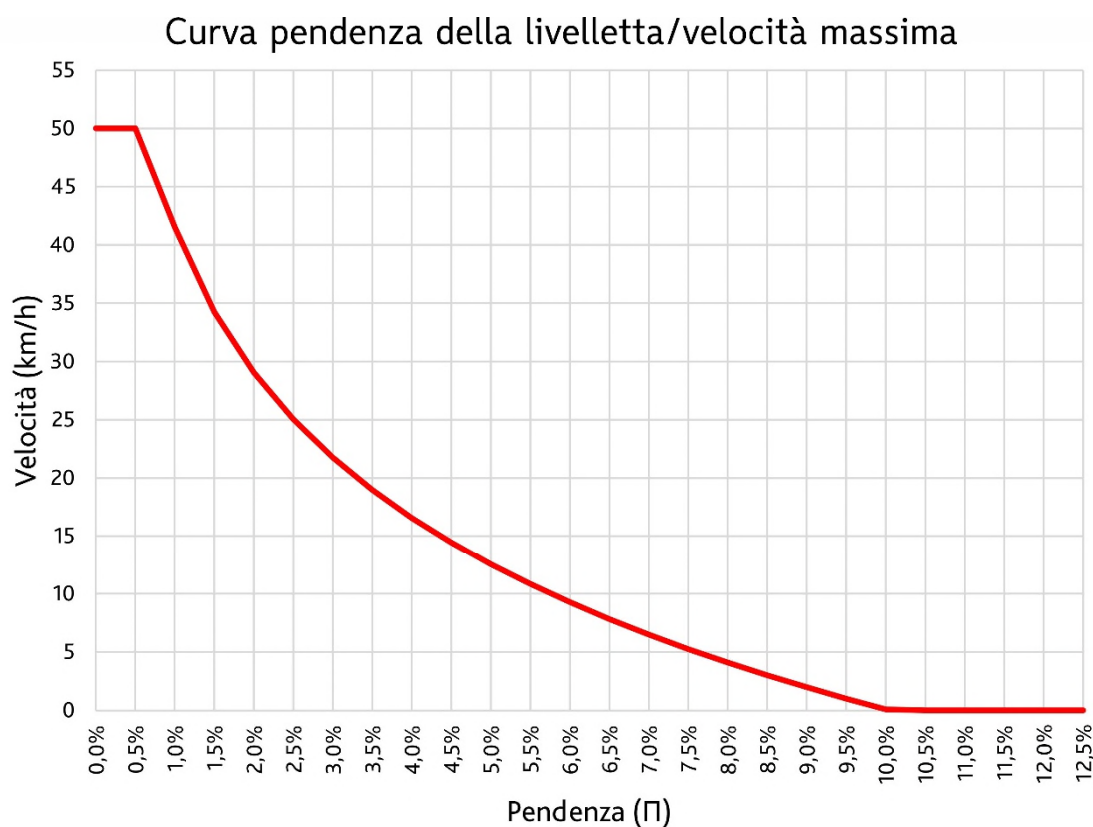
Nella sovrapposizione tra andamento planimetrico non rettilineo e pendenza della livelletta superiore allo 0,5 per mille, il modello sceglie la velocità massima inferiore stimata dalle due correlazioni (1) e (2).

Fig. 1 - Relazione tra raggio di curvatura del tracciato e velocità massima del mezzo



$$\begin{aligned}
 R \geq 85 \text{ m} & \quad V_{\text{MAX}} = 50 \text{ km/h} \\
 10 < R < 85 \text{ m} & \quad V_{\text{MAX}} = \alpha \cdot \ln(2 \cdot R) - \beta \quad \begin{aligned} \alpha &= 15,5 \\ \beta &= 19,0 \end{aligned} \\
 R \leq 10 \text{ m} & \quad V_{\text{MAX}} = 0
 \end{aligned}$$

Fig. 2 - Relazione tra pendenza della livelletta e velocità massima del mezzo



$$\Pi \geq 10\%$$

$$V_{MAX} = 0$$

$$0,5\% < \Pi < 10,0\%$$

$$V_{MAX} = \beta - \alpha \cdot \ln(100 \cdot \Pi) \quad \alpha = 18,0$$

$$\beta = 54,0$$

$$\Pi \leq 0,5\%$$

$$V_{MAX} = 50 \text{ km/h}$$

4. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Sull'infrastruttura di progetto è ipotizzato un servizio Piazza dei Martiri – Corticella – Castel Maggiore. I parametri di esercizio sono riassunti nella tabella seguente:

Tab. 1 – Parametri di esercizio della linea Piazza dei Martiri 1943-1945 – Castel Maggiore

Parametro	Piazza dei Martiri - Castel Maggiore
Lunghezza totale della linea (m)	7.388
Numero di fermate	18
Distanza media tra le fermate	410
Tempo di viaggio tra i due capolinea (minuti)	25,2
Velocità commerciale (km/h)	17,6
Tempo di cambio banco (minuti)	3,0
Tempo di giro (minuti)	53,4
Frequenza minima possibile (minuti)	1,2
Frequenza di servizio (minuti)	5,0
Posti offerti per senso di marcia (in ora di punta)	3.000
Flotta di servizio	12
Vetture di ricambio in caso di fuori-linea per manutenzione	2
Totale flotta	14

A fronte di una velocità commerciale di 17,6 km/h, la flotta necessaria è costituita da 12 vetture in servizio e 2 riserve per un totale di 14 vetture da 32 metri (misura indicativa). Nella tabella seguente il listato del programma di simulazione dell'esercizio:

Tab. 2 – Listato del programma di simulazione dell'esercizio

Linea Piazza dei Martiri - Corticella

From	To	Lenght	T _{RUN} (sec)	V _μ (km/h)	Prog. (minute)
Capolinea Emilio Lepido	Inizio curva Indipendenza	247	37	24,3	0,6
Inizio curva Indipendenza	Fine curva Indipendenza	41	6	24,9	0,7
Fine curva Indipendenza	Fermata Piazza XX Settembre	334	67	18,0	1,8
Fermata Piazza XX Settembre	Fermata Matteotti AV	253	57	15,9	2,8
Fermata Matteotti AV	Intersezione Tiarini/Jacopo Della Quercia	185	27	24,4	3,2
Intersezione Tiarini/Jacopo Della Quercia	Intersezione Zampieri/Serlio	86	15	20,3	3,5
Intersezione Zampieri/Serlio	Fermata Piazza dell'Unità	92	41	8,1	4,2
Fermata Piazza dell'Unità	Intersezione Tibaldi/Creti	153	25	22,0	4,6
Intersezione Tibaldi/Creti	Inizio curva Ferrarese	75	17	15,9	4,9
Inizio curva Ferrarese	Fine curva Ferrarese	55	12	16,4	5,1
Fine curva Ferrarese	Inizio curva Corticella	97	21	16,6	5,4
Inizio curva Corticella	Fine curva Corticella	39	8	16,4	5,6
Fine curva Corticella	Fermata Poliziano	162	48	12,1	6,4
Fermata Poliziano	Intersezione Magenta	40	12	11,9	6,6
Intersezione Magenta	Intersezione Cignani	74	14	18,4	6,8
Intersezione Cignani	Intersezione Calvart/G.M. Mitelli	135	19	25,9	7,1
Intersezione Calvart/G.M. Mitelli	Intersezione Lombardi/Barbieri	69	14	17,6	7,4
Intersezione Lombardi/Barbieri	Fermata Ippodromo	157	45	12,5	8,1
Fermata Ippodromo	Fermata Bassanelli	425	70	22,0	9,3
Fermata Bassanelli	Fermata Saliceto	353	64	19,8	10,3
Fermata Saliceto	Intersezione Giuriolo/Saliceto	51	18	10,4	10,6
Intersezione Giuriolo/Saliceto	Inizio rampa ingresso sottovia	146	22	23,8	11,0
Inizio rampa ingresso sottovia	Fine rampa ingresso sottovia	75	16	16,4	11,3
Fine rampa ingresso sottovia	Inizio rampa uscita sottovia	266	33	28,8	11,8
Inizio rampa uscita sottovia	Fine rampa uscita sottovia	75	16	16,4	12,1
Fine rampa uscita sottovia	Intersezione Croce Coperta	199	26	27,6	12,5
Intersezione Croce Coperta	Fermata Della Croce Coperta	67	39	6,2	13,2
Fermata Della Croce Coperta	Intersezione Rotatoria Stendahl	124	23	19,5	13,6
Intersezione Rotatoria Stendahl	Fermata Papini	211	49	15,4	14,4
Fermata Papini	Intersezione Roncaglio	228	30	26,9	14,9
Intersezione Roncaglio	Fermata Fiammelli	213	49	15,5	15,7
Fermata Fiammelli	Intersezione Don Fiammelli	88	20	15,5	16,1
Intersezione Don Fiammelli	Fermata Lipparini	184	47	14,0	16,8
Fermata Lipparini	Inizio intersezione Lipparini	130	23	20,0	17,2

From	To	Lenght	T _{RUN} (sec)	V _μ (km/h)	Prog. (minute)
Inizio intersezione Lipparini	Fine intersezione Lipparini	54	13	15,0	17,4
Fine intersezione Lipparini	Fermata Bentini	47	33	5,1	18,0
Fermata Bentini	Intersezione Marescalchi/Colombarola	203	29	25,5	18,5
Intersezione Marescalchi/Colombarola	Fermata Gorki	237	51	16,7	19,3
Fermata Gorki	Inizio curva 1 Sant'Anna	123	25	17,4	19,8
Inizio curva 1 Sant'Anna	Fine curva 1 Sant'Anna	40	9	16,4	19,9
Fine curva 1 Sant'Anna	Inizio curva 2 Sant'Anna	69	19	13,0	20,2
Inizio curva 2 Sant'Anna	Fine curva 2 Sant'Anna	23	5	16,4	20,3
Fine curva 2 Sant'Anna	Inizio curva 3 Sant'Anna	62	14	15,3	20,5
Inizio curva 3 Sant'Anna	Fine curva 3 Sant'Anna	57	6	37,4	20,6
Fine curva 3 Sant'Anna	Fermata Sant'Anna/Byron	105	40	9,5	21,3
Fermata Sant'Anna/Byron	Inizio curva Byron	46	13	12,3	21,5
Inizio curva Byron	Fine curva Byron	33	7	16,4	21,6
Fine curva Byron	Inizio curva Shakespeare	131	22	21,0	22,0
Inizio curva Shakespeare	Fine curva Shakespeare	38	6	22,5	22,1
Fine curva Shakespeare	Fermata Shakespeare	116	44	9,5	22,9
Fermata Shakespeare	Intersezione Bentini	212	29	26,1	23,3
Intersezione Bentini	Inizio curva Stazione Corticella	270	30	31,9	23,8
Inizio curva Stazione Corticella	Fine curva Stazione Corticella	32	6	19,7	23,9
Fine curva Stazione Corticella	Fermata Corticella SFM	39	32	4,4	24,5
Fermata Corticella SFM	Capolinea Castel Maggiore	325	42	27,6	25,2

Total length **7.388** meters
Average slope **0,24%**
Travel time **25,2** minutes
Average speed **17,6** km/h