



# COMUNE DI FIRENZE

## Sistema Tramviario Fiorentino

RTI Progettisti:



### PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER L'ESTENSIONE DEL SISTEMA TRAMVIARIO FIORENTINO NEI COMUNI DI FIRENZE, CAMPI BISENZIO E SESTO FIORENTINO - FASE C

#### LINEA 4.2 - ESTENSIONE PER CAMPI BISENZIO

### Studio Trasportistico Relazione generale sull'esercizio e dimensionamento del parco rotabile Linea 4.2

COMUNE DI FIRENZE  
SISTEMA TRAMVIARIO FIORENTINO

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO  
ING. FILIPPO MARTINELLI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO  
ING. CHIARA BERSIANI

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE E DEL COORDINAMENTO FRA  
LE VARIE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

ING. PAOLO MARCHETTI



#### Gruppo di Progettazione:

Ing. A. Piazza (Coordinatore Tecnico)  
Dott. Geol. F. Valdemarin (Progettazione Geologica)  
Ing. A. Benvenuti (Progetto Opere Idrauliche)  
Dott.ssa B. Sassi (Indagini Preliminari Archeologiche)  
Ing. F. Tamburini (Studi di carattere Ambientale)  
Ing. M. Angeloni (Valutazione Previsionale di Impatto Acustico)  
Ing. S. Caminiti (Prog. Ferrotranviario Studi Trasportistici)  
Ing. J. Wajs (Progetto Impianti Tecnologici)  
Ing. G. D'Angelo (Progetto Strutture)  
Ing. D. Salvo (Progetto Arch./Paesaggistico Inser. Urbanistico)  
Ing. F. Conti (Sicurezza - Prime Disposizioni)  
Ing. B. Rowenczyn (Piani Economici e Finanziari)  
Ing. G. Coletti (Progettazione Funzionale Depositi Tramviari)  
Ing. L. Costalli (Esperto in Esercizio)  
Ing. F. Azzarone (Impianti Meccanici)  
Ing. D. D'Apollonio (Impianti Elettrici)  
Ing. V. Astorino (Cantierizzazione)  
Ing. P. Caminiti (Viabilità Interferenti)  
Arch. A. Moscheo (PP.SS. Interferenti)  
Ing. A. Lucioni (CAM)  
Ing. D. Russo (Stime, Capitolati)

COMMESSA	LINEA	FASE	DISCIPLINA	TIPO/NUMERO	REV.	SCALA	NOME FILE
B382	42	SF	ESE	RT001	A		B382-4.2.-SF-ESE-RT001A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	Dicembre 2019	EMISSIONE	BARONCELLI	COSTALLI	MARCHETTI
1					
2					



Comune  
di Firenze

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER L'ESTENSIONE DEL SISTEMA  
TRAMVIARIO FIORENTINO NEI COMUNI DI FIRENZE, CAMPI BISENZIO E SESTO  
FIORENTINO – FASE C

CIG 70209921E3 - CUP H11E16001130001 + H11I12000010002

LINEA 4.2 - ESTENSIONE PER CAMPI BISENZIO

---

## Sommario

---

<b>1. PREMESSA</b> .....	3
<b>2. CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI</b> .....	4
<b>3. DATI DI INPUT</b> .....	6
3.1 INPUT PER IL MODELLO DI TRACCIATO .....	6
3.2 INPUT PER IL MODELLO DI VEICOLO .....	6
3.3 LIMITI DI VELOCITÀ .....	8
<b>4. CALCOLO DEL TEMPO DI PERCORRENZA</b> .....	10
4.1 PERCORRENZA IN MARCIA TESA .....	10
4.2 ULTERIORI CONTRIBUTI DI ESERCIZIO .....	11
4.2.1 <i>Tempi di sosta alle fermate</i> .....	11
4.2.2 <i>Tempi di attesa per mancata priorità semaforica</i> .....	11
4.2.3 <i>Margine di recupero in linea</i> .....	12
4.2.4 <i>Tempo di inversione ai terminali</i> .....	12
4.2.5 <i>Incremento dei tempi ai capilinea</i> .....	13
<b>5. CALCOLO DEL TEMPO DI GIRO</b> .....	14
5.1 CAPACITA' DI TRASPORTO E DIMENSIONAMENTO PARCO ROTABILI .....	16

## 1. PREMESSA

---

Scopo del presente documento è quantificare, in base al calcolo dei tempi di percorrenza nelle varie intertratte, i requisiti di velocità commerciale e di consistenza del parco materiale rotabile.

Il documento è stato articolato ipotizzando che l'esercizio della Linea di Estensione della T4.1 fino a Campi Bisenzio (Capolinea Rucellai) sia gestito come un unico servizio insieme alla tratta Leopolda-Le Piagge. Dal momento che l'esercizio delle due tratte sarà unico su 11.6 km di linea, è necessario acquisire gli elementi progettuali già in essere per la T4.1 in merito a tempi di percorrenza e dimensionamento della flotta, ed unirli a quelli nuovi relativi alla sua estensione: il documento di riferimento in merito è PPO208RT02 PROGETTO DELLA LINEA TRANVIARIA 4.1 PORTA AL PRATO PIAGGE - PROGETTO PRELIMINARE- STUDI ED INDAGINI PRELIMINARI: OFFERTA DI TRASPORTO.

Nell'ambito dei seguenti capitoli sono quindi analizzati i seguenti aspetti:

- calcolo dei tempi netti di percorrenza della linea;
- analisi e quantificazione dei parametri di esercizio e verifica della velocità commerciale;
- dimensionamento della flotta.

## 2. Criteri per la valutazione delle prestazioni

---

I parametri di esercizio sono stati configurati tenendo conto che:

- La marcia dei veicoli è “a vista”, assistita da impianto di segnalamento, nel rispetto del Codice della Strada: il guidatore procede ad una velocità tale da consentire l’arresto della vettura in uno spazio non superiore alla visuale libera;
- Agli incroci con la viabilità cittadina è previsto un sistema di “priorità semaforica” che consente ai veicoli della Tramvia di transitare agli incroci stessi con priorità rispetto agli altri veicoli stradali, limitando quindi i possibili rallentamenti dovuti alla congestione da traffico cittadino. Nella presente analisi si ipotizza che la priorità sia possibile perché garantita dalle Autorità competenti in materia, in tutte le condizioni di traffico previste;
- La Tramvia si inserisce nell’ambito di una preesistente rete di trasporto plurimodale, per lo più congestionata. La marcia dei veicoli tranviari avviene cioè in presenza contemporanea di altri autoveicoli privati e pubblici e di diversi altri fattori di disturbo alla regolarità di marcia (pedoni, auto in sosta, ecc.) Pur essendo la marcia dei veicoli tramviari, nella maggioranza dei casi, in sede riservata o protetta, ed assistita da impianto di “priorità semaforica”, il moto reale dei veicoli può risultare caratterizzato da interferenze di natura aleatoria e di incerta valutazione;
- Il raggiungimento delle prestazioni della Linea dipende quindi, oltre che dalle sue caratteristiche intrinseche (tracciato, accelerazioni, decelerazioni, velocità massima, ecc.), anche dal modo con cui è organizzata la circolazione veicolare, pedonale e la disciplina delle occupazioni dei suoli (soprattutto quelli adiacenti alla linea), in tutta l’area di influenza del tracciato.



Comune  
di Firenze

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER L'ESTENSIONE DEL SISTEMA  
TRAMVIARIO FIORENTINO NEI COMUNI DI FIRENZE, CAMPI BISENZIO E SESTO  
FIORENTINO – FASE C

CIG 70209921E3 - CUP H11E16001130001 + H11I12000010002

LINEA 4.2 - ESTENSIONE PER CAMPI BISENZIO

---

I principali dati di input attraverso i quali sono stati implementati i modelli del tracciato, dei veicoli e della loro reciproca interazione, sono sinteticamente riepilogati nel seguente capitolo 3.

---

### 3. DATI DI INPUT

---

#### 3.1 INPUT PER IL MODELLO DI TRACCIATO

Il modello del tracciato è schematizzato essenzialmente attraverso l'inserimento dei seguenti parametri:

- Sviluppo planimetrico quantitativo, in termini di progressive, caratteristiche di rettifili, curve circolari e clotoidi;
- Ubicazione degli incroci, o punti in conflitto potenziale con altri veicoli o flussi pedonali;
- Ubicazione di eventuali tratti in sede promiscua con il traffico veicolare;
- Caratteristiche specifiche in entrata ed uscita dalle stazioni (caratteristiche deviatoi, ecc.);
- Caratteristiche deviatoi e comunicazioni in linea.

#### 3.2 INPUT PER IL MODELLO DI VEICOLO

Il modello del veicolo è schematizzato attraverso l'inserimento dei seguenti parametri, in analogia con le altre linee in fase di progettazione per la rete tranviaria fiorentina:

- Dimensioni fisiche dei convogli;
- Masse a tara, massa a pieno carico e masse rotanti;
- Curva caratteristica di trazione;
- Curve caratteristiche di frenatura;
- Coefficienti di resistenza all'avanzamento;
- Caratteristiche di interazione ruota – rotaia



Comune  
di Firenze

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER L'ESTENSIONE DEL SISTEMA  
TRAMVIARIO FIORENTINO NEI COMUNI DI FIRENZE, CAMPI BISENZIO E SESTO  
FIORENTINO – FASE C

CIG 70209921E3 - CUP H11E16001130001 + H11I12000010002

LINEA 4.2 - ESTENSIONE PER CAMPI BISENZIO

Parametro	Valore
Massa a vuoto, massa trasportata e masse rotanti in kg	40700 kg Tara; 19320 kg Carico Pagante max; 60000 kg Peso Massimo; 3500 kg Masse Rotanti.
Lunghezza in metri	33.5 m
Coefficienti di resistenza al moto in piano e rettilineo	A=24.525 [N/t] B=0.14 [N / (t·km/h)] C=0.63 [N / (km/h) <sup>2</sup> ]
Valori massimi dell'accelerazione e decelerazione di servizio da adottare nelle simulazioni	acc= 1.16 m/s <sup>2</sup> ; dec_eq=1.30 m/s <sup>2</sup>
Tipo di frenatura e velocità minima per frenatura rigenerativa (se presente)	Freno Meccanico + Elettrico; Min velocità fren.ele: 5 km/h
Potenza media dei servizi ausiliari in kW	40 kW
Forza di trazione al cerchione in funzione della velocità	75 kN con sforzo costante fino a 30 km/h; sforzo decrescente da 75 kN a 50 kN da 30 a 45km/h (con Potenza costante); sforzo decrescente da 50 kN a 20 kN da 45 a 70 km/h (con Potenza decr. linearmente).
Forza di frenatura elettrodinamica al cerchione in funzione della velocità)	sforzo crescente da 55 a 70 kN da 70 a 55 km/h (con Potenza costante); 70 kN con sforzo costante da 55 a 5 km/h; Sforzo decrescente da 70 a 0 kN da 5 km/h a circa 3 km/h.
Forza di frenatura totale al cerchione in funzione della velocità	80 kN costante da 70 a 0 km/h
Rendimento in trazione e frenatura in funzione della velocità, dell'intera catena da pantografo a cerchione	0.875

### 3.3 LIMITI DI VELOCITÀ

I limiti di velocità sono stati definiti considerando i seguenti vincoli:

- Vincoli Geometrici di tracciato:
  - Andamento plano-altimetrico;
  - Posizione delle fermate;
  - Posizione ed estensione delle intersezioni veicolari e pedonali.
- Vincoli tecnologici:
  - Posizione delle comunicazioni e dei deviatori.
- Velocità limite:
  - Massima velocità di percorrenza della linea: 50 km/h;
  - Velocità massime in curva in funzione del raggio di curvatura;
  - Velocità massima di percorrenza dei deviatori: 20 km/h;
  - Velocità massima di percorrenza delle tratte in promiscuo: 25 km/h.

Allo scopo di non trascurare alcuna delle restrizioni sopraelencate, la velocità limite da applicare ad un determinato elemento del tracciato è stata definita come il minimo tra le velocità dovute ai vincoli che insistono sull'elemento considerato.

### 3.4 DESCRIZIONE DELLA LINEA

La linea T4.2 si configura come una linea di estensione della linea T4.1 Leopolda-Le Piagge. Le caratteristiche principali del solo tratto oggetto di questa progettazione sono riassunte nella tabella seguente, con riferimento ad un senso di percorrenza ed alla tratta di servizio passeggeri.



Comune  
di Firenze

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER L'ESTENSIONE DEL SISTEMA  
TRAMVIARIO FIORENTINO NEI COMUNI DI FIRENZE, CAMPI BISENZIO E SESTO  
FIORENTINO – FASE C

CIG 70209921E3 - CUP H11E16001130001 + H11I12000010002

LINEA 4.2 - ESTENSIONE PER CAMPI BISENZIO

---

	<b>Le Piagge – Rucellai</b>
<b>Lunghezza della linea di servizio ai passeggeri</b>	5562 m
<b>Numero di fermate (capolinea inclusi)</b>	11
<b>Lunghezza della tratta in promiscuo</b>	129 m
<b>Numero di intersezioni (escluse quelle estreme del promiscuo)</b>	10

---



## 4. CALCOLO DEL TEMPO DI PERCORRENZA

### 4.1 PERCORRENZA IN MARCIA TESA

La marcia tesa è il diagramma spazio-velocità che mostra l'andamento della percorrenza del veicolo considerato, dati i vincoli plano-altimetrici e di esercizio, i limiti di velocità che ne conseguono e le caratteristiche meccaniche del mezzo. Non corrisponde al tempo effettivo del servizio offerto agli utenti, ma al minimo tempo teorico di percorrenza del tracciato in assenza di servizio passeggeri e di interferenze esterne.

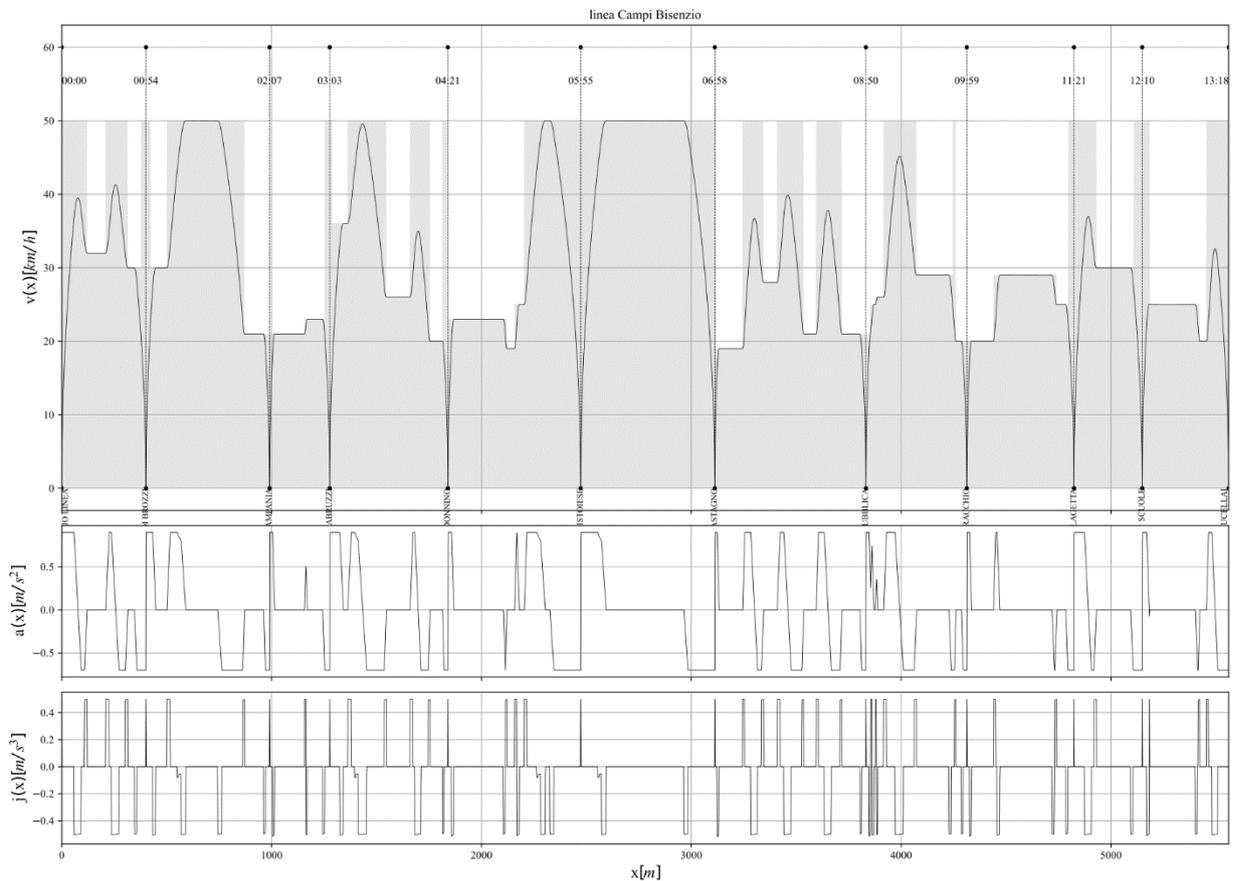


Figura 1 - Grafico della percorrenza in marcia tesa della linea Le Piagge - Rucellai

Il tempo netto di percorrenza della linea è 799s.

Nella tabella seguente è riportato il tempo di percorrenza cumulato ad ogni fermata a partire dal capolinea.

**Tabella 1 - Tempi intertratta in marcia tesa**

<i>Fermata</i>	<i>Prg [m]</i>	<i>T [s]</i>	<i>t [HH:MM:SS]</i>
<b>INIZIO LINEA</b>	0	0	00:00:00
<b>NAVE DI BROZZI</b>	401	54	00:00:55
<b>CAMPANIA</b>	990	128	00:02:08
<b>ABRUZZI</b>	1277	183	00:03:03
<b>SAN DONNINO</b>	1840	261	00:04:21
<b>PISTOIESE</b>	2473	355	00:05:55
<b>CASTAGNO</b>	3112	419	00:06:59
<b>REPUBBLICA</b>	3832	531	00:08:51
<b>RACCHIO</b>	4313	600	00:10:00
<b>PALAGETTA</b>	4824	681	00:11:21
<b>SCUOLE</b>	5149	730	00:12:10
<b>RUCELLAI</b>	5561	799	00:13:19

## 4.2 ULTERIORI CONTRIBUTI DI ESERCIZIO

### 4.2.1 Tempi di sosta alle fermate

Il tempo di sosta alle fermate (capolinea escluso) è inteso come l'intervallo di tempo intercorrente fra il momento in cui il veicolo è completamente fermo ed il momento in cui avviene la ripartenza del veicolo stesso, necessario per l'incarozzamento dei passeggeri.

Il tempo di sosta alle fermate è stato assunto pari a **20 secondi**, in analogia all'esercizio del resto della rete tranviaria fiorentina. Non è prevista alcuna eccezione, dal momento che non ci sono fermate particolarmente cariche.

### 4.2.2 Tempi di attesa per mancata priorità semaforica

Nel calcolo del tempo di giro si è tenuto conto di un tempo di sosta agli incroci che modellizza le perdite di fase semaforica ed i conseguenti ritardi, definito come il tempo massimo di sosta

nel caso in cui il tram perda la priorità. Secondo i dati del gestore della linea tranviaria attualmente in esercizio, tale tempo medio è assumibile in **5 s per ogni incrocio**.

#### 4.2.3 Margine di recupero in linea

Secondo l'esperienza del gestore, si considera un tempo aggiuntivo per garantire la regolarità del servizio e recuperare eventuali ritardi corrispondente a **5 secondi per ogni km** di linea percorso.

#### 4.2.4 Tempo di inversione ai terminali

Per entrambi i terminali, il tempo minimo di sosta deve prevedere la discesa dei passeggeri, l'inversione della cabina, la salita passeggeri (150 s), al quale si aggiunge una riserva aggiuntiva di perditempo minimo pari a 30 s dovuto al passaggio sullo scambio in deviata immediatamente prima o dopo l'attestazione al Capolinea.

Per il Capolinea Rucellai con comunicazione in testa l'inversione dei veicoli non prevede la retrocessione degli stessi al terminale, ovvero la banchina di partenza coincide con la banchina in cui è giunto il veicolo.

Per quanto riguarda Leopolda, i tempi considerati sono stati desunti dal progetto specifico.

**Tabella 2 - Tempi operativi ai capilinea**

	Rucellai
<b>Discesa dei passeggeri, inversione della cabina, salita passeggeri (secondi)</b>	150
<b>Perditempo (secondi)</b>	30
<b>Avanzamento verso lo scambio e retrocessione della vettura (secondi)</b>	
<b>Totale (secondi)</b>	<b>180</b>

---

#### 4.2.5 Incremento dei tempi ai capilinea

É necessario inoltre aumentare i tempi di sosta al capolinea, per poter garantire un necessario polmone di secondi atto ad assicurare la possibilità per il tram di ripartire in orario, anche se arrivato in (lieve) ritardo al capolinea. L'esperienza del gestore su linee in esercizio conferma che gli incrementi di tempo al capolinea non possono essere inferiori a 3 minuti per linea (somma dei due capolinea), pena un eccessivo propagarsi dei ritardi e conseguenti irregolarità di servizio.

## 5. CALCOLO DEL TEMPO DI GIRO

Il tempo di giro è stato calcolato come la somma dei contributi presentati ai paragrafi precedenti:

- Tempi di marcia interstazionali;
- Tempi di sosta alle fermate;
- Perditempo agli incroci veicolari e pedonali;
- Tempi di inversione ai terminali;
- Allungamento di regolarità in linea ed ai capilinea.

**Tabella 3 - Tempi di percorrenza in esercizio**

DA	A	LUNGHEZZA	PERC. TRATTA	TEMPO [s]		
				REGOLARITÀ	PERD. INTERS.	TOTALE
INIZIO LINEA	NAVE DI BROZZI	401	54	2	0	<b>56</b> 00:00:56
NAVE DI BROZZI	CAMPANIA	589	73	3	10	<b>86</b> 00:01:26
CAMPANIA	ABRUZZI	287	55	1	10	<b>67</b> 00:01:07
ABRUZZI	SAN DONNINO	563	78	3	0	<b>81</b> 00:01:21
SAN DONNINO	PISTOIESE	634	94	3	10	<b>107</b> 00:01:47
PISTOIESE	CASTAGNO	639	64	3	0	<b>67</b> 00:01:07
CASTAGNO	REPUBBLICA	720	112	4	5	<b>121</b> 00:02:01
REPUBBLICA	RACCHIO	481	69	2	0	<b>71</b> 00:01:11
RACCHIO	PALAGETTA	511	81	3	10	<b>94</b> 00:01:34
PALAGETTA	SCUOLE	325	49	2	5	<b>55</b> 00:00:55
SCUOLE	RUCELLAI	412	69	2	0	<b>71</b> 00:01:11
			<b>799</b>	<b>28</b>	<b>50</b>	<b>877</b> 00:14:37

Il tempo di percorrenza capolinea – capolinea da considerare è pari a **877 secondi, vale a dire 14 min 37 s**; il tempo totale di percorrenza intertratta e per tutta la linea è riportato nella tabella seguente.



Comune  
di Firenze

	Tempo in secondi	Tempo in minuti
Tempo in marcia tesa (a)	799	00:13:19
Margine di recupero in linea (b)	28	
Incremento per perditempo intersezioni (c)	50	
<b>Tempo totale percorrenza (a+b+c)</b>	<b>877</b>	<b>00:14:37</b>
Sosta alle fermate (d)	200	00:03:20
<b>Tempo totale linea</b>	<b>1077</b>	<b>00:17:57</b>

Devono essere considerati i medesimi tempi di esercizio calcolati per la **linea T4.1**

	Tempo in secondi	Tempo in minuti
Tempo in marcia tesa (a)	742	00:12:22
Margine di recupero in linea (b)	30.5	
Incremento per perditempo intersezioni (c)	100	
<b>Tempo totale percorrenza (a+b+c)</b>	<b>872</b>	<b>00:14:32</b>
Sosta alle fermate (d)	220	00:03:40
<b>Tempo totale linea</b>	<b>1092</b>	<b>00:18:12</b>

Il calcolo del tempo di giro che ne consegue è dato dagli addendi riportati in tabella:

**Tabella 4: Tempo di giro totale**

<i>tempo totale in linea</i>	2169
<i>Capolinea Rucellai</i>	180 s
<i>Capolinea Leopolda</i>	180 s
<i>Incremento tempo capilinea</i>	180 s
<b><i>Tempo di giro totale</i></b>	<b>4878 s</b>

Il **tempo di giro** totale include i tempi di sosta ed inversione ai capilinea e vale 4878 s, pari a **82 minuti**.

Il tempo di percorrenza capolinea-capolinea da considerare per il calcolo della velocità commerciale è dato dalla somma del tempo di percorrenza in marcia tesa e del tempo di fermata, in un esercizio senza perditempo di regolarità (a)+(d).

$$V_{\text{comm}} = 21.41 \text{ km/h}$$

Tuttavia la velocità commerciale effettiva di servizio al pubblico risente dei perditempo di regolarità e dei margini di recupero (a) + (b) +(c) +(d):

$$V_{\text{comm effettiva}} = 19.35 \text{ km/h}$$

Questi valori sono inferiori a quelli calcolati con riferimento alla sola T4.1, dal momento che la linea di estensione fino a Campi si inserisce in un contesto più urbanizzato ed è quindi meno veloce della tratta precedente, costruita perlopiù su sedime ex-ferroviario.

## 5.1 CAPACITA' DI TRASPORTO E DIMENSIONAMENTO PARCO ROTABILI

Il dimensionamento del parco rotabili si basa sulle seguenti ipotesi:

- il tempo di giro e le velocità commerciali determinate al precedente paragrafo;
- le risultanze dello studio trasportistico;
- la necessità di assicurare un servizio regolare ed appetibile, minimizzando i tempi di attesa in fermata, specialmente nelle ore di punta e diurne.

Dallo studio trasportistico risulta che **la frequenza di esercizio di progetto per l'ora di punta è 6 minuti 25 secondi (385 secondi)**. Dato il tempo di giro, risultano necessari in totale 13 mezzi per l'esercizio quotidiano della linea, a cui si aggiunge il 20% di riserva di veicoli disponibile, in Deposito o in altri punti della linea, per la sostituzione di veicoli in avaria o per veicoli impegnati sia per la manutenzione preventiva che per la correttiva.

**Tabella 5: Quantificazione del numero di mezzi necessari all'esercizio**

Veicoli in linea	13
Veicoli di riserva	3
<b>TOTALE VEICOLI</b>	<b>16</b>

Nel Progetto Preliminare della linea T4.1 era riportato un dimensionamento della flotta pari a 7 + 1 mezzi, per cui **il differenziale dovuto alla sola estensione è pari di nuovo a 8 mezzi.**