
Fondamenti di Ingegneria dei Trasporti

- Diagrammi del moto tipo e congruenza con l'equazione della trazione
- Capacità e prestazione di servizi di trasporto a linea, navetta e circolare
- Impostazione nuovi esercizi e discussione dei precedenti

Diagrammi del moto tipo e congruenza con l'equazione della trazione

Fondamenti di Ingegneria dei Trasporti

Diagrammi del moto «tipo» (1)

- Sono diagrammi del moto “semplificati” e rappresentativi di situazioni stilizzate, assimilabili in linea di larga massima e prima approssimazione ad andamenti ricorrenti del moto di un veicolo isolato.
 - I diagrammi del moto possono essere espressi utilizzando una qualsiasi grandezza cinematica
 - spazio percorso
 - velocità
 - Accelerazione
 - contraccolpo.
 - È anche evidente che è in genere possibile passare da uno all'altro attraverso operazioni di integrazione o derivazione.
-

Diagrammi del moto «tipo» (2)

- Si indichi con:
 - t un generico istante di tempo in cui si stiano valutando le caratteristiche di moto di un veicolo
 - $s(t)$ l'ascissa curvilinea che individua la posizione del veicolo all'istante t ;
 - $v(t) = ds(t)/dt$ la velocità istantanea del veicolo all'istante t ;
 - $a(t) = dv(t)/dt$ la accelerazione istantanea del veicolo all'istante t ;
 - $j(t) = da(t)/dt$ il contraccolpo (jerking) istantaneo del veicolo all'istante t .
- Utilizzando le variabili di sopra descriveremo 3 diagrammi del moto “tipo”:
 - diagramma rettangolare (o a velocità uniforme), in cui si trascurano le accelerazioni;
 - diagramma trapezio, con andamenti lineari della velocità, in cui si trascura il contraccolpo;
 - diagramma ad accelerazione lineare e contraccolpi costanti.

Diagramma rettangolare

- Si ipotizza che il veicolo viaggi a velocità uniforme per l'intera tratta.
 - In pratica, con una grossolana approssimazione, si ipotizza che i tratti iniziali di accelerazione e decelerazione siano trascurabili (a maggior ragione si trascura qualsiasi contraccolpo).
 - La velocità istantanea sia indicata con v_m , essendo costante il valore istantaneo, quello medio e quello massimo coincidono.
 - Il diagramma della velocità ha andamento rettangolare
 - Ad un qualsiasi istante di tempo t lo spazio percorso è pari a $s(t) = v_m t$
 - Il diagramma dello spazio percorso ha dunque andamento lineare.
 - In un tempo t_{AB} lo spazio percorso è pari a $L_{AB} = v_m t_{AB}$

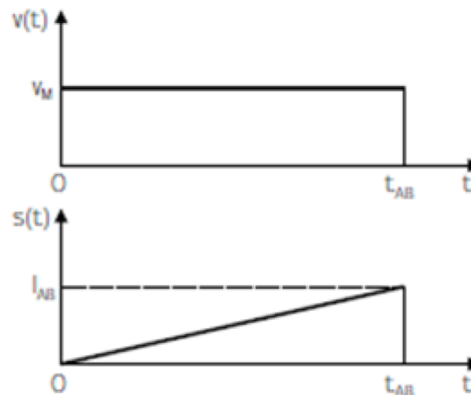
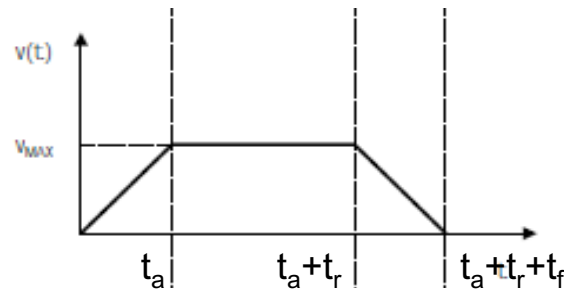


Diagramma trapezio(1)

- Si ipotizza che la velocità parta da un valore nullo per crescere linearmente fino ad una velocità di regime che viene poi mantenuta costante per un periodo dopo il quale decresce fino ad un valore nullo, anche in questo caso con una legge lineare.



- Si distinguono 3 fasi di moto:
 - Avviamento, dal tempo 0 al tempo t_a
 - Regime, per un ulteriore lasso di tempo t_r e quindi dal tempo t_a al tempo $t_a + t_r$
 - Frenatura, per un ulteriore lasso di tempo t_f e quindi dal tempo $t_a + t_r$ al tempo $t_a + t_r + t_f$.

Diagramma trapezio(2)

- Moto nella fase di avviamento.
 - Nella fase di avviamento si ipotizza un moto uniformemente accelerato (accelerazione costante, velocità lineare)
- Moto nella fase di regime.
 - Nella fase di regime il moto è uniforme:
- Moto nella fase di frenatura.
 - La fase di frenatura è analoga a quella di avviamento, con una decelerazione (supposta costante) non necessariamente uguale alla accelerazione della fase di avvio

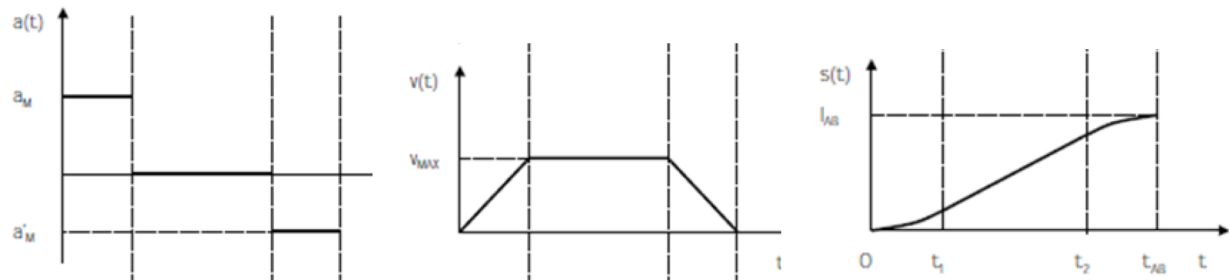
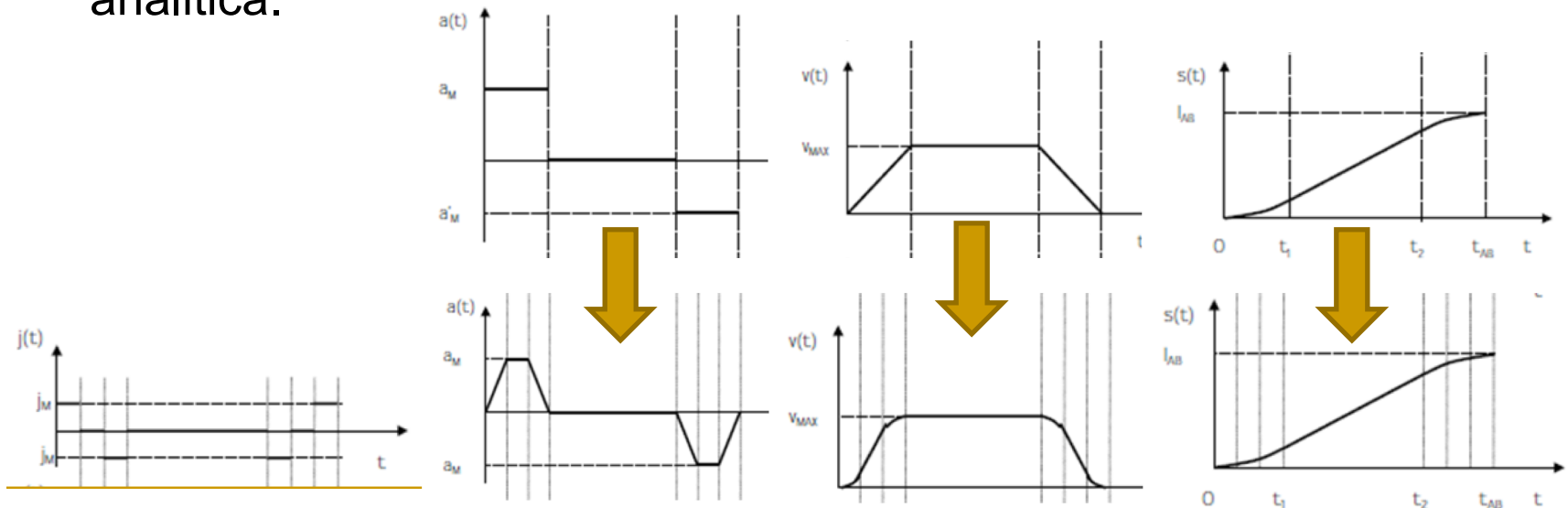


Diagramma ad accelerazione lineare e contraccolpi costanti(1)

- Simile al precedente, ma fasi di accelerazioni modellate in maniera più raffinata
- Si distinguono 3 fasi di moto:
 - Avviamento, dal tempo 0 al tempo t_a
 - Regime, per un ulteriore lasso di tempo t_r e quindi dal tempo t_a al tempo t_a+t_r
 - Frenatura, per un ulteriore lasso di tempo t_f e quindi dal tempo t_a+t_r al tempo $t_a+t_r+t_f$.
- A loro volta, le fasi di avviamento e di frenatura sono divise in 3 sotto-fasi, durante la prima ed ultima di queste si considera l'accelerazione variabile linearmente (contraccolpo costante non nullo):
 - $J(t) = J_M$
 - $a(t) = J_M t$

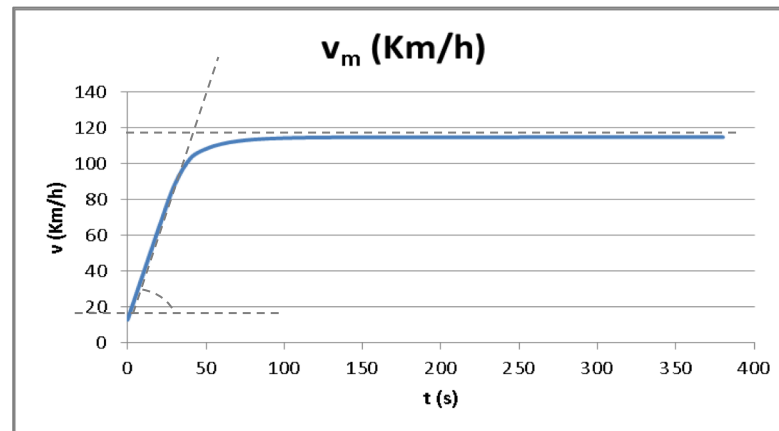
Diagramma ad accelerazione lineare e contraccolpi costanti(2)

- È il caso di notare che, ancorché il diagramma a contraccolpi costanti sia fisicamente più realistico di quello trapezio (l'accelerazione non subisce irrealistiche variazioni istantanee), la differenza in termini di calcolo ed integrazione delle grandezze cinematiche coinvolte è minima e determina delle differenze per lo più localizzate che non giustificano la maggiore complessità analitica.



Congruenza con l'equazione della trazione

- I diagrammi del moto tipo sono una rappresentazione approssimata e trattabile analiticamente di andamenti che in realtà si realizzano secondo le leggi dell'equazione della trazione.
- La velocità massima che un veicolo può raggiungere dipende da livelletta, aderenza, resistenze e potenza del motore
- Similmente accade per la accelerazione sui cui è possibile contare in fase di avviamento e per la decelerazione.



Sistemi basati su veicoli isolati:
capacità e prestazioni di servizi di
trasporto a linea, navetta, circolare

Fondamenti di Ingegneria dei Trasporti

Definizioni

- Una “linea” di trasporto è finalizzata a movimentare persone e/o cose lungo un itinerario predefinito (dunque secondo una ascissa curvilinea) e secondo un opportuno programma di esercizio
 - L’itinerario composto da almeno due punti del territorio
 - In genere servizio anche in punti intermedi dell’itinerario.
 - Se la linea non compie soste intermedie si parla di “navetta”.
- Aspetto caratteristico di una linea di trasporto è il ritorno dal punto di arrivo al punto di partenza con lo scopo:
 - di ritornare al punto di partenza per caricare ulteriori persone e cose;
 - di offrire il servizio anche in verso opposto.
- Un capolinea è un luogo di sosta particolare
 - durata tecnica della sosta è diversa da quanto strettamente necessario per la salita/discesa di persone e cose.
 - esercizio “per direttrice”, due capolinea
 - linea è una “circolare”, un solo capolinea

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Parametri di esercizio

I principali **parametri di esercizio** di una linea di un sistema trasporto collettivo sono:

- **velocità commerciale media**
 - **frequenza del servizio** (o, in alternativa, **intertempo**)
 - **capacità oraria**
 - **tempo di giro**
 - **numero di veicoli necessari al servizio**
 - **posti-km e veicoli-km** (misurano il quantitativo di offerta di trasporto prodotta)
 - **passengeri-km** (misurano il quantitativo di servizio utilizzato dagli utenti)
-

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Velocità commerciale media

E' il rapporto tra il lunghezza della linea ed il tempo medio di percorrenza della stessa, comprensivo del tempo di sosta alle fermate:

$$v_{CM} = L_{AB}/t_{AB}$$

dove:

L_{AB} è la lunghezza della linea

t_{AB} è il tempo di percorrenza della linea comprensivo dei tempi di sosta alle fermate

La velocità commerciale media può essere diversa per le diverse tratte delle linee

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Frequenza del servizio ed intertempo

La **frequenza φ** di una linea i è il numero di veicoli (autobus, treni, ecc.) di quella linea che passano per una fermata in un'ora

L'unità di misura della frequenza è **veic./h**

I valori di frequenza utilizzati nei sistemi di trasporto collettivo su gomma variano di norma **da 3 a 12 veicoli/ora in ambito urbano**

Valori inferiori di frequenza sono utilizzati in ambito extraurbano

L'**intertempo IT** di una linea è il distanziamento temporale tra il passaggio successivo di due veicoli della linea per una qualunque fermata

L'unità di misura dell'intertempo è **minuti**.

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Frequenza del servizio ed intertempo

La relazione che lega l'intertempo con la frequenza è:

$$IT = 60 / \varphi$$

<i>Esempio:</i>	$\varphi = 3$ veicoli/ora	$IT = 20$ minuti
	$\varphi = 6$ veicoli/ora	$IT = 10$ minuti
	$\varphi = 12$ veicoli/ora	$IT = 5$ minuti

La frequenza (o intertempo) influisce molto sulla **qualità del servizio per gli utenti** influenza il **tempo di attesa t_a degli utenti alle fermate**:

$$t_a = \eta IT/2 = \eta 30/\varphi \quad \eta \in [0.5, 1]$$

Se servizio regolare ed arrivo casuale degli utenti alle fermate $\eta = 0.5$

Se servizio irregolare $\eta \rightarrow 1$

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Capacità oraria

La **capacità oraria CAP** di una linea è il **flusso massimo trasportabile su una certa tratta** (passeggeri/h,

La capacità oraria è data da:

$$CAP = \varphi \times k$$

dove k è il capacità del veicolo esercito sulla linea i ed φ è la frequenza del servizio

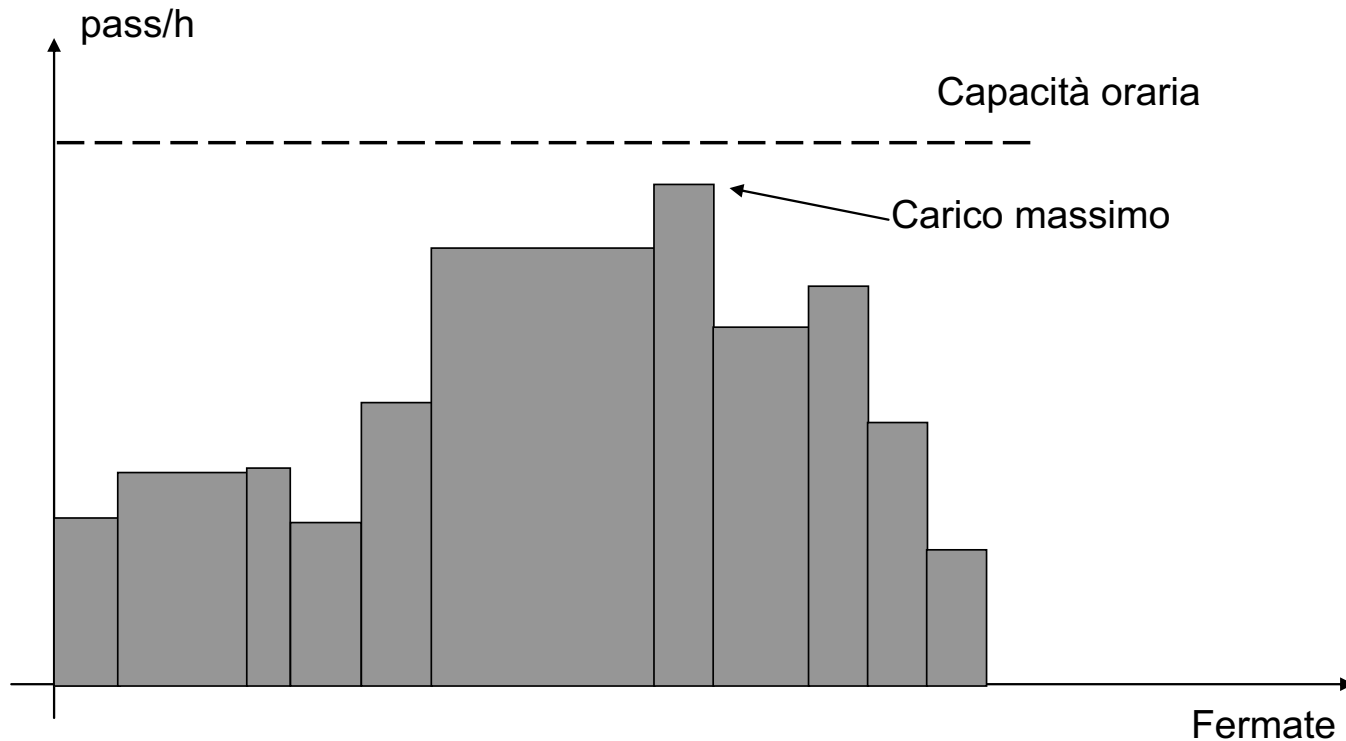
In fase di progettazione, la frequenza e la capacità del veicolo devono essere fissate in modo da ottenere una **capacità oraria maggiore della domanda massima di carico**

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Diagramma di carico di una linea

Riporta i **passengeri/ora** che utilizzano la linea di trasporto **in ciascuna tratta**

Si traccia nota la domanda di trasporto tra le fermate della linea



Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Tempo di giro

Il **tempo di giro TG** è il **tempo** che impiega un veicolo in esercizio su di una linea a **compiere un giro completo**, cioè a passare due volte per una stessa fermata

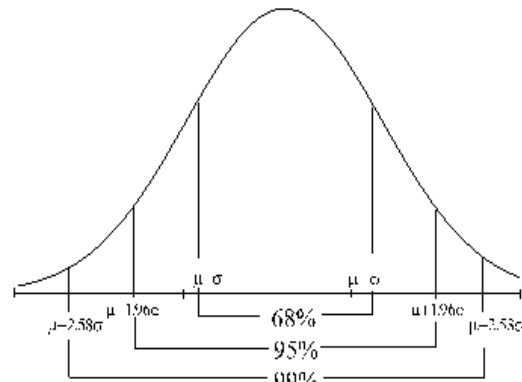
Esso **comprende i tempi di inversione ai capolinea** (o al capolinea nel caso di linea circolare)

Il **tempo di inversione al capolinea TI** è il **tempo che intercorre tra l'arrivo di un veicolo al capolinea e la partenza dello stesso per la corsa successiva** (di ritorno per linee A/R)

Esso tiene conto del **tempo necessario all'inversione del veicolo**, **dei tempi di riposo del personale viaggiante** e dei **tempi di recupero** (fissati per recuperare eventuali ritardi in linea)

Sul tempo di recupero

- Il tempo di recupero al capolinea è utile per rendere regolare il servizio
 - Un tempo di recupero elevato favorisce la regolarità del servizio, ma a prezzo di un aumento del tempo di giro e quindi della diminuzione della frequenza e, ancora, della diminuzione della capacità.
- Il tempo di recupero al capolinea può essere calcolato/regolato a posteriori osservando i tempi di corsa
 - È tipico osservare una distribuzione gaussiana che, se il tempo di corsa non è stato stimato in maniera sistematicamente errata, ha come media il tempo di corsa e varianza tanto maggiore quanto più aleatorio e disturbato è il tempo di corsa.



Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Tempo di giro

Il tempo di giro si calcola come:

Linea A/R (due capolinea):

$$TG = (L_A + L_R)/v_{CM} + 2 TI$$

Linea Circolare (un capolinea):

$$TG = L/v_{CM} + TI$$

dove:

TG è il tempo di giro in ore

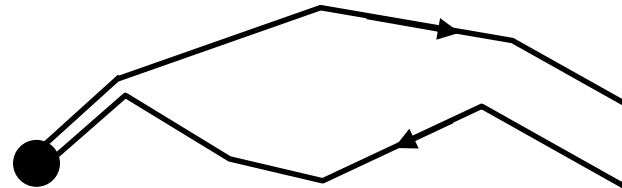
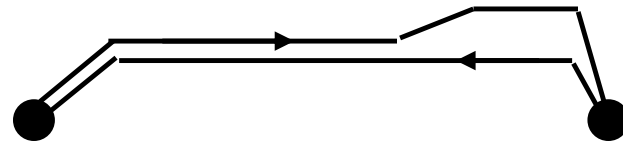
L_A è la lunghezza della linea in andata in km

L_R è la lunghezza della linea in ritorno in km

L è la lunghezza totale della linea circolare in km

v_{CM} è la velocità commerciale in km/h

TI è il tempo di inversione al capolinea in ore



Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Numero di veicoli necessari per il servizio

Il **numero di veicoli N** necessari per poter esercire la linea i rispettando la frequenza di esercizio φ si calcola come:

$$N_i = \text{Int}(TG_i \times \varphi) + 1$$

oppure:

$$N_i = \text{Int}(60 \times TG_i / IT) + 1$$

Tale valore si incrementa, in generale, del 10-20% per tener conto delle esigenze di manutenzione e della possibilità di guasti o di corse supplementari

Esempio:

Se il tempo di giro è 50 minuti occorre un veicolo per mantenere una frequenza di 1 veic./h; infatti, alla fine del tempo di giro lo stesso veicolo può effettuare anche la corsa successiva

Se il tempo di giro è invece di 1 h e 10 min occorrono 2 veicoli per mantenere la frequenza di 1 veic./h; infatti occorre un secondo veicolo per mantenere la stessa frequenza

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Posti-km e veicoli-km

Sono **indicatori della quantità di servizio prodotto**; possono riferirsi ad un'ora, un giorno, un anno o altro intervallo temporale di riferimento

I **veicoli-km** prodotti in un'ora e in un giorno sono dati rispettivamente da:

$$\text{veicoli-km} = \varphi \times L_i \quad (\text{in un'ora})$$

$$\text{veicoli-km} = \sum_{h=1, \dots, 24} \varphi(h) \times L_i \quad (\text{in un giorno})$$

dove $\varphi(h)$ è la frequenza relativa all'ora h del giorno.

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Posti-km e veicoli-km

I **posti-km** si calcolano in modo analogo, tenendo conto della capacità dei singoli veicoli k :

$$\text{posti-km} = \varphi \times L_i \times k \quad (\text{in un'ora})$$

$$\text{posti-km} = \sum_{h=1, \dots, 24} \varphi(h) \times L_i \times k(h) \quad (\text{in un giorno})$$

dove $k(h)$ è la capacità dei veicoli utilizzati nell'ora h del giorno

Trasporto collettivo – Parametri di esercizio

Passeggeri-km

E' un **indicatore della quantità di servizio “venduto” agli utenti**; anche esso può riferirsi ad un'ora, un giorno, un anno o altro intervallo temporale di riferimento

I passeggeri-km trasportati in un'ora o in un giorno sono dati da:

$$\text{passeggeri-km} = \sum_{t \in T_i} \sum_{h \in H_i} p_k(c_h) \times L_k$$

dove:

t rappresenta il generico tratto del percorso T_i della linea i

h è l'indice rappresentante la generica corsa c_h ed H_i il totale delle corse

$p_k(c_h)$ il numero di passeggeri a bordo della tratta k sulla corsa c_h

L_k la lunghezza della tratta k

L'indice si riferirà all'ora o al giorno a seconda se si considerano nella sommatoria le corse dell'ora o del giorno

Esercizio

Si supponga di dovere organizzare il trasporto di truppe ed attrezzature da un campo di atterraggio ad una base logistica. La distanza tra i due punti sia di 4 chilometri. L'itinerario può essere considerato in piano e le condizioni della pavimentazione sono tali da potere contare su un coefficiente di aderenza pari a 0,35. Il trasporto può avvenire dei Ducato-Minibus da 82 Kw di potenza motore, del peso di 2 tonnellate e dalla capienza di 15 passeggeri (più il guidatore). Si supponga che ogni passeggero abbia un peso medio, comprensivo della attrezzatura, di 80 kg e che sia necessario trasportare 200 passeggeri in un'ora. Il trasporto avvenga istituendo un servizio di navetta. Si consideri un coefficiente di variazione (deviazione standard su media) dei tempi di corsa pari a 0,4. La velocità massima consentita dai limiti di velocità sia di 50 km/h. Ipotizzando un diagramma del moto trapezio che sia compatibile con l'equazione della trazione si determini il numero di veicoli da noleggiare tale da ottenere una capacità di trasporto non inferiore a 200 passeggeri/ora. Si identifichi e costruisca il diagramma del moto (trapezio) per un veicolo del servizio di navetta e si verifichi l'equazione della trazione in via numerica.