

Capacità e potenzialità di una linea (1/4)

Per due convogli/veicoli che si susseguono possono essere definiti due tipi di distanziamento:

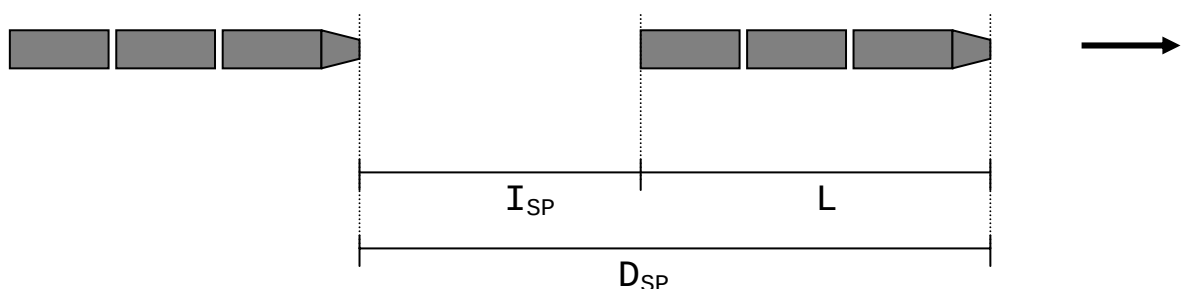
- **Distanziamento spaziale D_{SP}** : è la distanza che intercorre tra i piani verticali perpendicolari alla traiettoria della corrente e tangenti alle estremità anteriori dei convogli
- **Distanziamento temporale D_T** : è il tempo necessario affinché il piano tangente al convoglio che segue raggiunga la posizione del piano tangente al convoglio che precede

Si definiscono, analogamente, gli **intervalli spaziale (I_{SP})** e **temporale (I_T)** le analoghe grandezze, facendo riferimento ai piani verticali perpendicolari alla traiettoria della corrente e tangenti alla estremità posteriore del convoglio che precede ed anteriore al convoglio che segue

Detta v la velocità del convoglio che segue, sussistono le seguenti relazioni:

$$D_{SP} = v D_T$$

$$I_{SP} = v I_T$$



Della L la **lunghezza del convoglio** che precede si ha:

$$D_{SP} = I_{SP} + L$$

Capacità e potenzialità di una linea (2/4)

Il numero di convogli che transiterebbe nell'unità di tempo per la sezione ferroviaria se il distanziamento temporale (secondi) si manterrebbe costante, è detto **volume** o **flusso** V :

$$V = 1/D_T \quad (\text{conv.}/s)$$
$$V = 3600/D_T \quad (\text{conv.}/h)$$

Si definisce **potenzialità** P di una linea il numero massimo di convogli che, nell'unità di tempo, può transitare per la sezione; essa è pari all'inverso del **distanziamento temporale minimo** D_{Tmin} :

$$P = 1/D_{Tmin} \quad (\text{conv.}/s)$$
$$P = 3600/D_{Tmin} \quad (\text{conv.}/h)$$

Il distanziamento temporale minimo è pari al **distanziamento spaziale minimo**, D_{SPmin} , diviso la velocità del convoglio che segue:

$$D_{Tmin} = D_{SPmin}/v$$

dove D_{SPmin} è pari alla somma di:

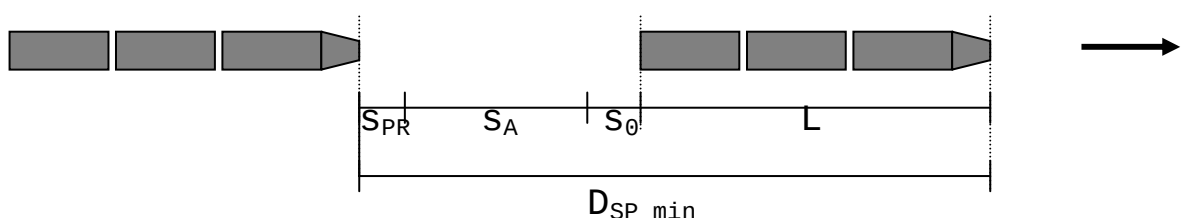
$s_{PR} = v t_{PR}$ spazio percorso nel tempo di percezione e reazione

s_A spazio di arresto

s_0 franco di sicurezza

L lunghezza del convoglio che precede

t_{PR} tempo di percezione e reazione



Capacità e potenzialità di una linea (3/4)

Nell'ipotesi di decelerazione costante (a_m) lo spazio di arresto è dato da (vedi diagramma del moto trapezio):

$$s_a = v^2 / (2 a_m)$$

Per cui si ha:

$$D_{T \min} = t_{PR} + v / (2 a_m) + (s_0 + L) / v \quad (s)$$

$$P = 1 / [t_{PR} + v / (2 a_m) + (s_0 + L) / v] \quad (\text{conv.}/s)$$

$$P = 3.600 / [t_{PR} + v / (2 a_m) + (s_0 + L) / v] \quad (\text{conv.}/h)$$

Si definisce **capacità nominale** della linea, C_N , l'inverso del **minimo distanziamento temporale** che può essere **garantito con continuità** nell'unità di tempo, D_T^0 , in condizioni di sicurezza; esso dipende dalla **tipologia dei sistemi di circolazioni** adottati per la linea:

$$C_N = 1 / D_T^0 \quad (\text{conv.}/s)$$

$$C_N = 3.600 / D_T^0 \quad (\text{conv.}/h)$$

Dalla capacità nominale può anche essere espressa in termini di **passengeri trasportati**, noto il **numero di veicoli per convoglio** N (vagoni passeggeri) e la **capacità di ogni singolo vagone** p :

$$C_N = p N / D_T^0 \quad (\text{pass.}/s)$$

$$C_N = 3.600 p N / D_T^0 \quad (\text{pass.}/h)$$

Capacità e potenzialità di una linea (4/4)

La **capacità effettiva**, C_E , si ottiene moltiplicando la capacità nominale per due **coefficienti riduttivi** (minori di 1):

- il **fattore di carico** (σ), è il rapporto tra l'occupazione media dei veicoli p_M e l'occupazione massima teorica p ($\sigma = p_M/p$); assume valori compresi tra 0,8 e 0,95; in fase di progettazione tale valore può essere imposto in funzione del comfort di viaggio che si vuole dare all'utente (grado di occupazione massimo dei veicoli);
- il **fattore di utilizzazione** (Γ), è il rapporto tra il distanziamento D_T^0 ed il valore che può essere realmente rispettato per avere una elevata regolarità di esercizio D_T^{00} ($\Gamma = D_T^0 / D_T^{00}$); assume valori compresi tra 0,7 e 0,9;

Le capacità effettive sono, pertanto:

$$C_E = \Gamma / D_T^0 \quad (\text{conv.}/s)$$
$$C_E = 3.600 \Gamma / D_T^0 \quad (\text{conv.}/h)$$

$$C_E = \Gamma \sigma p N / D_T^0 \quad (\text{pass.}/s)$$
$$C_E = 3.600 \Gamma \sigma p N / D_T^0 \quad (\text{pass.}/h)$$

Esempio di calcolo di capacità effettiva per una metropolitana:

$$D_T^0 = 5 \text{ min} = 300 \text{ sec}$$

$$p = 150 \text{ pass./veic.}$$

$$N = 5 \text{ veic.}$$

$$\Gamma = 0,8$$

$$\sigma = 0,9$$

$$C_E = 0,0027 \text{ conv.}/s = 9,6 \text{ conv.}/h = 1,8 \text{ pass.}/s = 6.480 \text{ pass.}/h$$

Confronto tra prestazioni per sistemi di trasporto

Parametro	Sistema di trasporto				
	BUS	TRAM	LRT	RRT	RGR
Capacità vetture (posti/veic.)	40-120	80-120	100-200	120-300	140-200
N. vetture per convoglio	1	1-3	2-4	3-10	1-10
Capacità convoglio (posti/conv.)	40-120	80-360	200-800	360-3.000	140-2.000
Velocità massima (km/h)	40-80	60-70	60-100	80-100	80-130
Frequenza massima (conv./h)	60-120	60-120	40-90	20-40	10-30
Capacità di linea (pass./h)	2.400-8.000	4.000-15.000	6.000-2.0000	15.000-30.000	10.000-35.000
Velocità commerciale (km/h)	15-25	12-20	20-45	25-60	40-70
Distanza tra le stazioni (m)	200-500	200-500	350-800	500-2.000	1.200-4.500

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (1/8)

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)

Velocità commerciale media

E' il rapporto tra la 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 calcolata, ovviamente, anche tratta per tratta.

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (2/8)

Frequenza del servizio

La **frequenza** f_i 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**.

Ad esempio, i valori di frequenza utilizzati nei sistemi di trasporto collettivo su gomma variano da 3 a 12 veicoli/ora in ambito urbano; valori inferiori di frequenza sono utilizzati in ambito extraurbano.

L'**intertempo** I_i di una linea i 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**.

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

$$I_i = 60/f_i$$

Esempio:	$f_i = 3$ veicoli/ora	$I_i = 20$ minuti
	$f_i = 6$ veicoli/ora	$I_i = 10$ minuti
	$f_i = 12$ veicoli/ora	$I_i = 5$ minuti

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (3/8)

La **frequenza** (o l'intertempo) influisce molto sulla **qualità del servizio per gli utenti**.

Essa, infatti, influenza il **tempo di attesa t_a degli utenti alle fermate**. La relazione che lega l'intertempo (o la frequenza) al tempo di attesa (nell'ipotesi di servizio regolare ed arrivo casuale degli utenti alle fermate) è la seguente:

$$t_a = I_i/2 = 30/f_i$$

Capacità oraria

La **capacità oraria C_i** di una linea i è il **carico massimo**, in termini di passeggeri, **trasportabile su una certa tratta**; essa può essere calcolata come visto per la capacità effettiva di una linea di trasporto ferroviario. Più rapidamente essa può essere calcolata in funzione della frequenza (o dell'intertempo) e della capacità del veicolo. Si parla di carico massimo perché il numero di passeggeri a bordo dei veicoli di una linea di trasporto varia da una tratta all'altra.

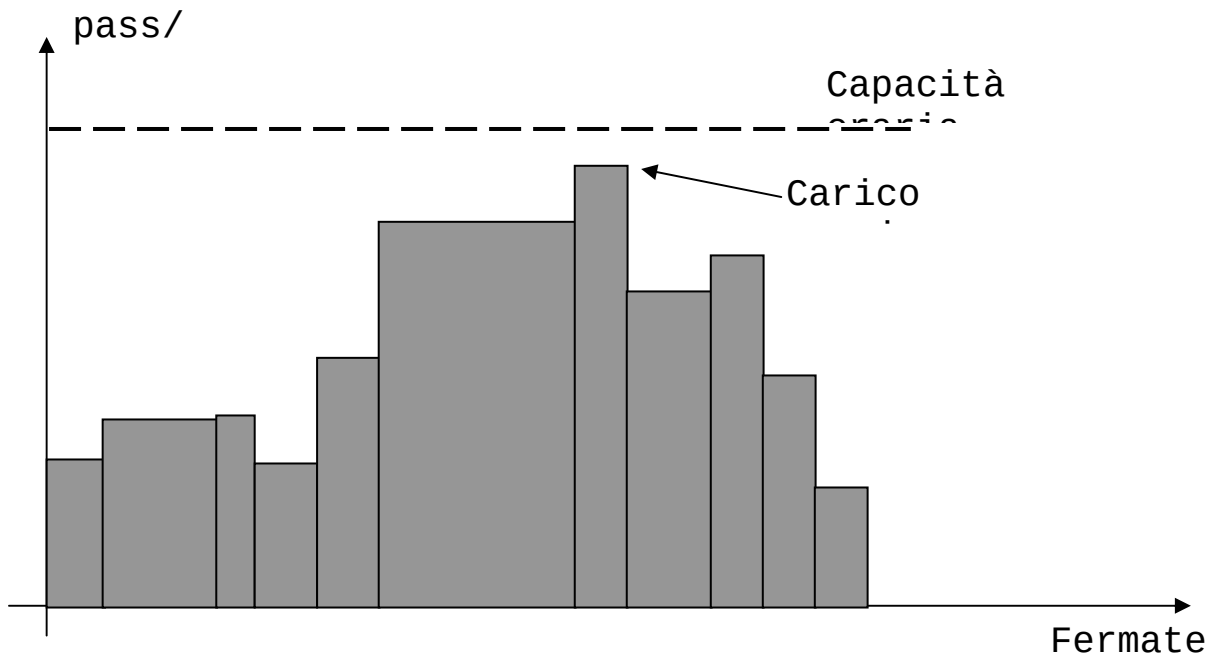
La capacità oraria è data da: $C_i = f_i \times Cap_i$

dove Cap_i è il capacità del veicolo esercito sulla linea i .

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

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (4/8)

Diagramma di carico di una linea



Tempo di giro

Il **tempo di giro** TG_i 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).

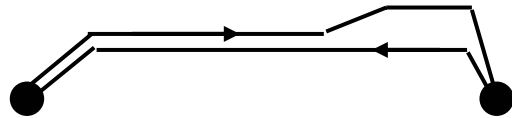
Il **tempo di inversione al capolinea** TI_i è il tempo che intercorre tra l'arrivo di un veicolo al capolinea e la partenza dello stesso per la corsa successiva (di ritorno per linee A/R); esso tiene conto del tempo necessario all'inversione del veicolo, dei tempi di riposo del personale viaggiante e dei tempi di recupero (fissati per recuperare eventuali ritardi in linea).

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (5/8)

Il tempo di giro si calcola come:

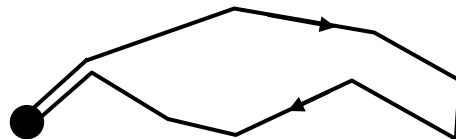
Linea A/R (due capilinea):

$$TG_i = (L_{A,i} + L_{R,i})/v_{CM,i} + 2 TI_i$$



Linea Circolare (un capolinea):

$$TG_i = L_i/v_{CM,i} + TI_i$$



dove:

TG_i è il tempo di giro in ore

$L_{A,i}$ è la lunghezza della linea in andata in km

$L_{R,i}$ è la lunghezza della linea in ritorno in km

L_i è la lunghezza totale della linea circolare in km

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

TI_i è il tempo di inversione al capolinea in ore

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (6/8)

Numero di veicoli necessari per il servizio

Il numero di veicoli NV_i necessari per poter esercire la linea i rispettando la frequenza di esercizio f_i si calcola come:

$$NV_i = \text{Int}(TG_i \times f_i) + 1$$

oppure:

$$NV_i = \text{Int}(60 \times TG_i / I_i) + 1$$

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.

Ad 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.

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (7/8)

Posti-km e veicoli-km

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I parametri di esercizio dei sistemi di trasporto collettivo (8/8)

Passeggeri-km

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

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

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

dove:

k rappresenta il generico tratto del percorso K_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.

I costi dei servizi di trasporto

I soggetti che sopportano i costi connessi ad un sistema di trasporto possono essere raggruppati in tre categorie:

- soggetti **proprietari e/o gestori dell'infrastruttura** e del relativo sistema di controllo (ad esempio: Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, ecc.)
- soggetti **produttori del servizio di trasporto** (ad esempio: aziende di trasporto collettivo, Trenitalia, ecc.)
- soggetti **fruitori del sistema di trasporto** (utenti)

A questi va aggiunta la **collettività** che, in molti casi, sopporta i costi, sia monetari (tasse) che non monetari (impatti), di un sistema di trasporto.

Ad esempio:

- la costruzione (e manutenzione) di una strada statale è effettuata con soldi pubblici e quindi con costi diretti sulla collettività (che pertanto assume il ruolo di proprietario e gestore)
- le aziende di trasporto collettivo hanno delle sovvenzioni Regionali indispensabili per mantenere i prezzi dei titoli di viaggio a valori politicamente accettabili (la collettività assume parte dei costi di produzione del servizio)

Tre sono le tipologie di costi connessi ad un sistema di trasporto:

- costi di **costruzione e manutenzione dell'infrastruttura**
- costi di **produzione del servizio**
- costi di **uso del servizio**

Costi di costruzione e manutenzione

Sono costi che ricadono sul proprietario dell'infrastruttura e/o sulla collettività

Infrastrutture stradali e ferroviarie

Il costo di costruzione di una infrastruttura può essere valutato come costo a km; esso dipende dalle caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, dal tipo di piattaforma e dalle opere d'arte necessarie (ponti, viadotti, gallerie, ecc.).

Per le ferrovie, in particolare, devono essere considerati tra i costi tutti gli impianti (segnalamento, comunicazione, alimentazione, illuminazione, ecc.).

Una valutazione preliminare può essere effettuata considerando i km di infrastruttura con determinate caratteristiche (in viadotto, in galleria, in trincea, in rilevato, ecc.); ad ogni tipologia può essere attribuito, per analogia con i costi sostenuti in progetti precedenti, un costo a km (Euro/km). Tra i costi non devono essere dimenticati gli eventuali espropri. Il costo totale di costruzione è dato dalla somma dei prodotti tra il costo a km di una data tipologia per i km della stessa tipologia.

A titolo puramente indicativo:

- il costo a km di una infrastruttura stradale varia tra 1 e 7 milioni di Euro a km.**
- il costo di una infrastruttura ferroviaria, invece, supera, in genere, i 15 milioni di Euro a km.**

I costi di manutenzione sono valutati a km per anno; in questo caso, anche le condizioni climatiche e il quantitativo e la tipologia del traffico previsto (% di mezzi pesanti o tipologie di treni) influenza il costo di manutenzione. Anche i costi di manutenzione sono stimati per analogia.

Costi di produzione dei servizi di trasporto (1/4)

Sono costi che **ricadono sul produttore del servizio**; in alcuni casi, parte di questi costi sono trasferiti alla collettività (sovvenzioni alle aziende di trasporto collettivo).

Nel caso del **trasporto stradale individuale**, il **produttore del servizio è l'utente** del servizio stesso.

Tali costi comprendono:

- **costi di acquisizione dei veicoli**
- **costi di gestione**
 - *gestione e manutenzione veicoli*
 - *gestione terminali*

Possono anche essere suddivisi in:

- ◆ **costi fissi** (indipendenti dal traffico)
- ◆ **costi variabili** (funzione del traffico)

- Di seguito si riportano dei cenni sui metodi di stima dei costi di produzione del servizio per i sistemi di **trasporto collettivo**

Costi di produzione dei servizi di trasporto (2/4)

Per una azienda di trasporto collettivo i costi da valutare per la produzione del servizio sono:

- **costi di acquisizione veicoli**
- **costi di gestione veicoli ed infrastrutture**

I **costi di acquisizione** si rilevano dai listini delle case produttrici.

I **costi di gestione** sono:

- ❑ *costi di manutenzione ordinaria*: valutabili pari a circa l'1 % all'anno del costo di acquisto;
- ❑ *costi di manutenzione straordinaria*: valutabili pari a circa il 10 % del costo di acquisto ogni 5 anni;
- ❑ *costi di esercizio*: valutabili pari al costo di 3 addetti/anno per ogni veicolo di linea;
- ❑ *costi di manutenzione delle infrastrutture*: valutabili pari al 5 % del costo di realizzazione dell'opera ogni 5 anni e, per i depositi e magazzini, in aggiunta il costo di un custode.

I **costi annuali di gestione** C_{AG} possono essere valutati in maniera analitica come:

$$C_{AG} = C_p + C_t + C_q + C_a + C_m + C_g$$

dove:

- C_p costo del personale aziendale
- C_t costo per la trazione
- C_q quote di ammortamento capitale
- C_a costo per assicurazioni e tasse di circolazione
- C_m costo per la manutenzione
- C_g spese generali

Costi di produzione dei servizi di trasporto (3/4)

Costo del personale aziendale

E' dato da:

$$C_p = \sum c_p(y) P_{Az}^y$$

dove:

$c_p(y)$ è la retribuzione media contrattuale di un addetto di categoria y

P_{Az}^y è il numero di addetti della categoria y

Il numero di addetti è valutabile come:

- *personale di guida*, valutabile pari a 2,5-3,5 addetti per veicolo per anno
- *altro personale di movimento*, pari al 20-30% del personale di guida
- *personale amministrativo*, pari al 10-15% del personale di guida
- *personale ausiliario*, pari ad 1 addetto ogni dieci veicoli del parco, comprensivo dei veicoli di scorta (15-20% dei veicoli in esercizio)

Costo per la trazione

E' dato da:

$$C_t = C_{car} + C_{lub} + C_{pne}$$

dove:

C_{car} è il costo del carburante

C_{lub} è il costo dei lubrificanti

C_{pne} è il costo dei pneumatici

Ognuno di questi costi C_x è dato da: $C_x = c_x \cdot (q_x \cdot PA)$

con: PA percorrenza annua del veicolo (km), c_x costo unitario materiale (Euro/x), q_x consumo unitario (x/km).

Costi di produzione dei servizi di trasporto (4/4)

Costo per la manutenzione

E' dato da:

$$C_m = c_m PA$$

con c_m costo per km della manutenzione (dipende dai programmi di manutenzione di ogni singolo veicolo).

Quote di ammortamento

I costi attribuibili alle quote di ammortamento sono espresse come somma di tre aliquote:

A_v ammortamento veicoli

A_u ammortamento uffici

A_d ammortamento depositi

Ogni quota di ammortamento è calcolata in funzione della vita utile dei veicoli o del periodo di ammortamento degli edifici.

Costo per assicurazioni e tasse di circolazione

Derivano direttamente dalle tariffe vigenti.

Spese generali

Comprendono le spese per: forniture elettriche, acqua, telefono, pulizie, riscaldamento e climatizzazione, cancelleria, spese legali ed interessi passivi.

Si assume per esse un valore pari al 10-20% del totale dei costi precedenti.