

**II UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
“TOR VERGATA”**

Dipartimento di Ingegneria Civile

Corso di
Trasporti Urbani e Metropolitani

Docente: Ing. Pierluigi Coppola

***Classificazione e prestazioni dei
sistemi di trasporto collettivo***

(bozza in corso di revisione)

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

SOMMARIO

1	CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO COLLETTIVO.....	1
1.1	Classificazione dei sistemi di trasporto urbano.....	1
1.2	Sistemi di trasporto collettivo ordinari, speciali ed innovativi. Caratteristiche di base.	4
1.3	Le prestazioni dei diversi sistemi di trasporto collettivo.	9
2	CARATTERISTICHE DELLE SEDI VIARIE.....	10
2.1	Tipologia di infrastrutture viarie.....	10
2.2	Caratteristiche di tracciato	13
2.3	Distanza tra le fermate	14
3	CARATTERISTICHE DEI VEICOLI DI TRASPORTO PUBBLICO.....	16
3.1	Introduzione.....	16
3.2	Dimensioni e capacità dei veicoli.....	16
3.3	Prestazioni cinematiche e tecnologiche	17
4	CAPACITA' DI UNA LINEA DI TRASPORTO.....	19
4.1	Capacità teorica della linea	19
4.2	Capacità di tratta	21
4.3	Capacità di stazione	22

1 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO COLLETTIVO

1.1 Classificazione dei sistemi di trasporto urbano.

Si riportano nel seguito alcuni criteri di classificazione dei servizi di trasporto collettivo (T.C.) e alcune definizioni di base che ricorreranno nella trattazione, a volte con sigle rappresentative, a volte con termini in lingua inglese significativi.

É importante operare una prima classificazione distinguendo tra mezzo di trasporto privato e mezzo di trasporto collettivo propriamente detto; nell'ambito di quest'ultimo occorre distinguere ancora:

- a) mezzi che effettuano servizio vincolato da orari o percorsi (transit);
- b) veicoli non soggetti a tali vincoli (paratransit).

Si può fare riferimento alla tabella 2.1, che riassume i mezzi di trasporto secondo la tipologia d'uso.

Un servizio di T.C. può essere definito in base a quattro sue caratteristiche:

- 1. vincolo di percorso (right-of-way: R/W) o semplice mente "tipo di sede";
- 2. tecnologia;
- 3. tipo di servizio;
- 4. diffusione.

Contrariamente a quel che si crede, non é tanto la tecnologia a caratterizzare un mezzo di trasporto, quanto la sua R/W; per esempio un servizio tranviario é più simile a un servizio di autobus che non ad un servizio di treno rapido.

1. In rapporto al grado di separazione della sede viaria si possono definire tre classi di sistemi di trasporto:

Categoria A, quando la sede viaria del veicolo è completamente protetta. In tal caso, percorsi e flussi sono indipendenti da quelli di altri mezzi di trasporto. A tale categoria appartiene per esempio il servizio di un mezzo che viaggia in un tunnel .

Categoria B, quando la sede viaria del veicolo è fisicamente protetta. Si hanno pertanto percorsi con separazione fisica longitudinale dagli altri flussi di traffico, ma con possibilità di passaggio per veicoli e pedoni (es. intersezioni semaforizzate).

Categoria C. I percorsi si svolgono in superficie con traffico promiscuo, anche se a volte può essere prevista una corsia riservata.

In figura 7.1 del capitolo 7 è riportato un esempio di tipo di sedi.

2. Nella tecnologia rientrano le caratteristiche meccaniche di veicoli e di supporti; si possono distinguere:

supporto (gomma, acciaio, acqua, sospensione magnetica, sospensione ad una guida sovrastante);

Tab 2.1 Classificazione del trasporto passeggeri urbano per tipo d'uso

Caratteristiche	TIPO D'USO			
	Privato	A domanda		Pubblico o collettivo
Denominazione usuale	Trasporto privato	Individuale	emicollettivo	Collettivo
Disponibilità di servizio	Personale	Individuale	Pubblico	Pubblico
Fruitore del servizio	Utente singolo	Individuale	Gruppi	Vettore
Determinaz. percorso	Utente (flessibile)	Individuale	Utente	Vettore (fissato)
Determinaz. orario	Utente (flessibile)	Individuale	Utente	Vettore (fissato)
Tariffa-costo	Costo-utente	Individuale	Tariffa fissata	Tariffa fissata
Tipo di trasporto	Individuale		Collettivo	
Modi	Autovettura	Auto in comune	Taxi	Autobus a prenotaz.
	Autocarro	Autobus in comune	Autobus a noleggio	Jitney
	Bicicletta			Bus a noleggio
	Piedi			Autobus speciali ed innovativi
Referibile (ma non unico) dominio di operatività:				
Aree a densità	Medio-bassa	Bassa in origine Alta in destinazione	Bassa	Medio-Alta
Percorsi	Dispersi	Radiali	Dispersi	Concentrati (radiali)
Ore	Non di punta	Di punta	Tutte	Di punta, di giorno
Motivo di viaggio	svago, acquisti	lavoro	Affari	Lavoro, studio, affari

guide eventuali (per es. presenza o meno di rotaie); la guida può essere: libera, se il veicolo dispone di organi di guida che consentono lo spostamento in tutte le direzioni (con limiti sul piano di rotolamento),

oppure vincolata, se il veicolo non dispone di organi di guida ed è vincolato a muoversi lungo una traiettoria definita del piano di rotolamento;

sistema propulsivo, distinto per tipo di energia utilizzata (carburante combusto, elettricità) e tecnica di trasmissione della trazione (cavo, aderenza, magnete, ecc.); nel caso di veicoli equipaggiati con motore a combustione interna di carburante, non sono richiesti impianti di alimentazione esterni; se invece i veicoli sono equipaggiati con motore elettrico, l'alimentazione avviene attraverso una linea di contatto, che trasmette l'energia da generatori fissi; si possono distinguere ancora: veicoli equipaggiati con motore elettrico alimentato da un generatore diesel; veicoli con motori commutabili per trazione diesel e trazione elettrica (es. dual-bus); veicoli con motori a induzione magnetica;

controllo: manuale-visivo (a vista), segnaletico (semi- automatico), automatico; nel controllo a vista il distanziamento tra i veicoli è assicurato dai conducenti; nel secondo caso il distanziamento tra i veicoli è imposto ai conducenti mediante segnali esterni; nel terzo infine, manca il conducente e i distanziamenti veicolari sono gestiti da elaboratore in sede e su veicolo.

3. Parlare di tipo di servizio non è sufficiente, occorre precisarne ulteriormente i caratteri distintivi; è possibile considerare ad esempio le tre seguenti classificazioni:

a) per dimensione del viaggio:

percorsi brevi, o spostamenti entro piccole aree (es. aeroporti o centri direzionali);

percorsi urbani, relativi al servizio interno alle città;

percorsi regionali, relativi al servizio su lunghe distanze.

b) secondo la durata delle operazioni di servizio (diagramma orario):

servizio regolare (o di base); è un servizio giornaliero continuo (in realtà occorre dire che il "giorno" può variare da 14 a 24 ore e la settimana da 5 a 7 giorni);

servizio supplementare o periodico; è un tipo di servizio ordinario aggiuntivo su particolari fasce orarie con punte alte di domanda;

servizio straordinario o occasionale: è attivato solo in speciali occasioni (emergenze, esibizioni, ecc.);

servizio a domanda; è impiegato, ad esempio, su aree a domanda debole.

4. Secondo il livello di diffusione si possono distinguere sistemi di trasporto collettivo di tre tipi:

convenzionali ordinari;

convenzionali speciali (funicolari, scale mobili, ascensori);

innovativi (di moderna sperimentazione).

Una classificazione più generale dei servizi di trasporto collettivo può essere basata soprattutto, ma non esclusivamente, sulla tipologia R/W; distingueremo allora le seguenti tre classi di servizi:

a) STREET TRANSITS (stradale). Operano principalmente in strade urbane a traffico misto (R/W C); esistono interferenze, si realizzano basse velocità commerciali e frequenti fermate; appartengono a tale classe servizi di linea urbana (trolley, tram,...);

b) SEMIRAPID TRANSITS (semiveloci). Utilizzano soprattutto veicoli di categoria R/W B, anche se a volte sono impiegati veicoli con R/W A o C. Le caratteristiche di viaggio possono essere variabili lungo il percorso, per esempio può essere prevista una corsia riservata in aree congestionate. La capacità di trasporto é in genere medio-alta;

c) RAPID TRANSITS (veloci). Sono servizi caratterizzati da elevate prestazioni (alta velocità, flessibilità, sicurezza); i mezzi utilizzati sono di categoria R/W A, di grande capacità, e sono tutti a guida vincolata (rotaia).

Esistono poi particolari servizi di trasporto collettivo, operanti per ambiti distinti di utenza (aereo, funicolare, aliscafi, traghetti). Una classificazione ancora più generale potrebbe coinvolgere anche altre componenti fisiche dei servizi di T.C. (infrastrutture per la sosta, stazioni, depositi, sistemi di controllo e segnalamento, ecc.).

1.2 Sistemi di trasporto collettivo ordinari, speciali ed innovativi. Caratteristiche di base.

I sistemi di trasporto collettivo sono identificati generalmente come sistemi in grado di offrire un servizio regolare, con percorsi ed orari predeterminati, a gruppi di utenti. Si distinguono nettamente dai sistemi individuali, semicollettivo ed a moto continuo.

Tra i primi rientrano i taxi, ovvero autovetture guidate da un addetto ed utilizzate dagli utenti per spostamenti individuali; il servizio (orario, origine, destinazione dello spostamento) è interamente soggetto al desiderio degli utenti; l'uso del taxi può comportare maggiori attese rispetto a quello dell'auto privata, ma non si pone per l'utente il problema della ricerca di spazi per la sosta. L'utente non è soggetto a responsabilità per il mezzo, ma il costo del viaggio (tariffa) è il più elevato tra tutti i modi di trasporto su strada.

I sistemi semicollettivi si differenziano in quanto gli utenti devono organizzarsi e concordare il servizio con l'esercente (orario di partenza, località di origine e di destinazione). Il servizio "a prenotazione", in inglese denominato a volte dial-a-ride, è garantito in genere da furgoni o minibus diretti da un ufficio di controllo centrale. Gli utenti chiamano l'ufficio e segnalano l'origine, la destinazione e il momento desiderato d'inizio dello spostamento. L'ufficio pianifica il percorso del mezzo in modo da servire, con un viaggio, il maggior numero possibile di passeggeri. Questo genere di servizio è attivato usualmente in aree a bassa densità insediativa ed appare come un sistema intermedio tra sistema individuale e sistema collettivo regolare. I viaggi possono avere un'estremità comune ("one to many") o entrambe le estremità disperse ("many to many"). Rispetto al taxi si hanno minori costi d'uso e maggiori capacità di trasporto; gli spostamenti però sono meno personalizzati, più lenti e meno diretti (più fermate, percorsi tortuosi).

I sistemi a moto continuo sono particolari sistemi di trasporto collettivo, caratterizzati dal fatto che lo spostamento degli utenti è garantito dal moto della sede viaria (nastro, scala mobile). I servizi convenzionali si svolgono su brevi percorsi, in aree ristrette quali centri commerciali, aeroporti, stazioni.

Nel seguito ci si riferisce più specificamente ai sistemi di trasporto collettivo, analizzandone gli aspetti qualitativi e quantitativi sotto diversi punti di vista.

Nel precedente paragrafo i sistemi di trasporto collettivi sono stati distinti, in rapporto alla diffusione, in convenzionali (ordinari e speciali) ed innovativi.

Sistemi convenzionali speciali sono definiti quelli impiegati in alcune città per superare forti acclività ed evitare percorsi lunghi e tortuosi; sono generalmente a guida vincolata (ascensori, funicolari, cremagliere), ma comunque in grado di garantire un servizio regolare di trasporto.

I sistemi convenzionali ordinari, cosiddetti perchè ormai di uso comune nelle città occidentali, comprendono: autobus, filobus, tram, metropolitane leggere, pre-metrò, metropolitane, ferrovie suburbane; a questa classe sono ormai associati pure sistemi considerati innovativi qualche anno fa, come il VAL.

Le caratteristiche di base essenziali dei sistemi ordinari sono riassunte nella Tabella 2.2; esse sono riconducibili ad alcuni elementi strutturali (sede viaria, livello di separazione della circolazione, sistema di propulsione) e ad alcune qualità distintive dell'esercizio (guida, controllo, velocità).

L'autobus (Regular Bus: RB) è un sistema a guida libera su gomma, a trazione termica (diesel), con marcia a vista su sede promiscua, raramente in sede propria; è largamente impiegato in città, in versioni più o meno diverse (minibus, autoarticolati, bus a due piani), in virtù della sua flessibilità garantita dalla libertà da vincoli d'impianto e della sua capacità di coprire un ampio spettro di livelli di servizio, di costi, d'impatto.

L'esercizio su sedi riservate o comunque di categoria R/W A o B garantisce elevate prestazioni e maggiore affidabilità; in tal caso si può definire il sistema "semiveoce" (SRB: Semirapid Regular Bus).

Il filobus (o trolley-bus: TB) è un sistema assai simile all'autobus; se ne differenzia soprattutto per sistema propulsivo: la trazione è elettrica e la potenza motrice è fornita attraverso due cavi sopraelevati (bifilari) lungo percorsi prestabiliti e quindi vincolanti. Questo svantaggio è compensato dai riflessi positivi sull'ambiente (minore inquinamento), dai minori costi d'esercizio e dalla maggiore durata dei veicoli.

Il tram (o Street Car Rail: SCR) è un sistema a guida vincolata su rotaia (binario), ad alimentazione elettrica (rete aerea come per i filobus), con regime di circolazione a vista, di regola su strade urbane ordinarie. Il vincolo di tracciato che impedisce modifiche nel percorso, la promiscuità della sede che rende vulnerabile la regolarità del servizio a causa delle interferenze intermodali, i costi d'impianto sono tra i fattori limitativi; i vantaggi derivano soprattutto dalla durata notevole di impianti e vetture, dai bassi costi di esercizio e manutenzione, dagli scarsi effetti inquinanti, dalla maggiore capacità di trasporto connessa alla possibilità di composizione di vetture in convoglio.

La metropolitana (o metrò, o Rail Rapid Transit: RRT) è definita dalla norma UNI 8379 come << sistema di trasporto rapido di massa, di alta capacità e frequenza, costituito da veicoli automotori o mossi da veicoli automotori circolanti su rotaia, ovvero con altra guida vincolante e completamente svincolata da qualsiasi altro tipo di traffico, con regime di circolazione regolata da segnali >>.

A tale definizione è associata pure quella di metropolitana leggera (o semi-metrò) quale << sistema di trasporto rapido di massa che mantiene le caratteristiche della metropolitana, ad eccezione della portata oraria, che è prevista minore, e dei veicoli che, qualora opportunamente attrezzati, possono essere utilizzati su tratti di linea che, avendo caratteristiche tranviarie, non rientrano nella categoria delle metropolitane leggere >>.

A completamento della suddetta definizione se ne aggiunge un'altra fornita dalla International Light Rail Commission: << la metropolitana leggera (Light Rail Transit o LRT in inglese, Stadtbahn in tedesco, e Métro Léger in francese) è una forma di trasporto su rotaia che può essere sviluppata per fasi da un tram moderno ad un sistema di trasporto rapido circolante in sede propria o sotto terra. Ciascuno stadio di sviluppo può essere completo di per sé, ma deve rendere possibile gli sviluppi per passare al successivo >>.

La metropolitana è il sistema di trasporto urbano (o suburbano) con maggiore capacità di trasporto e velocità commerciale. La grande capacità di trasporto è offerta da vetture a grande sagoma, dalla composizione in lunghi convogli di queste, nonché dalle elevate frequenze di servizio.

Il tracciato può essere superficiale, sopraelevato o in galleria; per il minore impatto ambientale e la libertà di disegno dei percorsi è più frequente la realizzazione di infrastrutture sotterranee (Americ.: subway; German.: U-bahn).

La metropolitana leggera appare come un sistema capace di offrire un servizio intermedio tra quello tranviario e quello del metrò; le vetture (in genere di tipo tranviario, ovvero a sagoma di dimensione contenuta) possono circolare nelle seguenti condizioni previste dalle situazioni locali di traffico e di ambiente:

- in sede propria, completamente separata dal restante traffico stradale, senza alcuna interferenza con questo;
- in sede propria, per alcuni tratti di linea e nei restanti tratti solo parzialmente separata dal traffico stradale, accettando incroci con questo in punti prestabiliti e comunque con circolazione privilegiata e protetta da apposito segnalamento semaforico;

Tab 2.2 Caratteristiche di base dei sistemi convenzionali ordinari

Sistema	RW	Tipo di supporto	Sistema di guida	Sistema di trazione	Tipo di controllo	Velocità di servizio	Sigle
Autobus	C	gomma	libera	diesel	a vista	locale	RB
	B	gomma	libera	diesel	a vista	semivelece	SRB
Filobus (Trolley)	C	gomma	libera	elettrico	a vista	locale	TB
Tram	C	ferro	vincolata	elettrico	a vista	locale	SCR
Metro leggero (semi-metro)	A-C	ferro/gomma	vincolata	elettrico	a vista -semaf semaf.	semi-veloce veloce	LTR LRRT
Premetro		ferro	vincolata	elettrico	semaf. autom.	semi-veloce	-
Metropolitana	A	ferro	vincolata	elettrico	semaf. autom.	veloce	RRT
Ferrovia suburbana	A	ferro	vincolata	elettrico	semaf.	veloce	RGR

- promiscuamente con il traffico stradale, osservando le segnalazioni semaforiche agli incroci allo stesso titolo degli altri modi di trasporto.

I problemi principali derivanti dalle metropolitane leggere sono connessi ai riflessi ambientali derivanti da viadotti, rampe di accesso alle gallerie o elementi-barriera, e dai fenomeni d'interferenza con le altre modalità di trasporto in sede promiscua. I vantaggi sono quelli tipici dei sistemi su rotaia (elevate capacità, alta produttività, comfort, affidabilità, ecc.).

Un cenno a parte merita il sistema "pre-metrò"; esso è così definito per la concezione con la quale è programmata la sua realizzazione; l'idea fondamentale è che il sistema, pensato inizialmente come tranviario, possa gradualmente trasformarsi in sistema di metropolitana (leggera o meno).

In genere sono realizzate infrastrutture sotterranee su lunghezze limitate e laddove risulti difficile l'inserimento del tracciato in superficie.

I vantaggi di questo sistema di trasporto sono riconoscibili nella possibilità di distribuire nel tempo gli oneri di impianto, di risolvere rapidamente problemi di traffico locale e nella concezione unitaria della futura rete metropolitana.

Per prestazioni più elevate e maggiori lunghezze dei percorsi sono realizzate, soprattutto in aree metropolitane, le cosiddette ferrovie suburbane (o Regional Rail: RGR); tali sistemi hanno tutte le caratteristiche del metrò, ma operano in genere con convogli più lunghi, su percorsi più estesi, con poche fermate e con velocità elevate; sono a volte impiegate vetture a due livelli.

In ambienti urbani in cui la morfologia territoriale può essere di notevole ostacolo ai collegamenti, si adottano a volte dei sistemi di trasporto "speciali". Sono così detti quei servizi in sede propria ed a guida vincolata quali le ferrovie a cremagliera, le funicolari, gli ascensori. Essi consentono di superare pendenze notevoli e fino al limite del 100% (ascensori).

Nei sistemi a cremagliera tale prestazione è consentita dalla sostituzione del principio dell'aderenza ruota-strada con quello dell'ingranamento tra ruota dentata e rotaia seghettata; nel caso della funicolare la trazione viene esercitata da un cavo ed il motore di trazione non si trova a bordo del veicolo, bensì in sede fissa in corrispondenza delle estremità terminali della linea; l'ascensore risponde allo stesso principio, con cabine sollevate entro una guida scatolare su un comando diretto dell'utenza.

Una trattazione separata sarà riservata nella parte finale del testo ai sistemi di trasporto innovativi; in questo capitolo essi sono definiti per grandi linee e sono presentati gli esempi realizzativi più interessanti. Innovativi sono detti quei sistemi di trasporto di recente sperimentazione non ancora diffusi su larga scala, che si collocano in ambito intermedio tra i sistemi convenzionali, con novità tecnologiche (per es. duplice sistema di propulsione) o di esercizio (per es. guida automatica), o di sostegno viario (es. monorotaia sospesa).

Numerosi sono i sistemi sperimentati negli ultimi decenni, ma pochi di essi sono entrati in servizio regolare, per lo più su linee brevi ed aree poco estese (aeroporti, campus universitari).

Un sistema innovativo di particolare interesse è la monorotaia nella duplice versione "sottostante" e "sopristante" al veicolo; nel primo caso le vetture scorrono sopra una trave-guida, nel secondo le vetture si trovano sotto l'infrastruttura e viaggiano sospese ad essa.

In entrambi i casi l'infrastruttura è un viadotto e la sua realizzazione comporta costi non indifferenti e problemi di impatto ambientale. Il sistema di monorotaia a vettura appoggiata

più famoso è il sistema "Alweg" di Colonia (RFT); quelli più noti, a vetture sospese, sono lo "Schwebbahn" di Wuppertal (RFT) e il "Safege" (F). Di più recente sperimentazione sono "l'Urbatrain" (Lione, F) con sospensione a cuscino d'aria e motore a induzione lineare, e "l'H-Bahn" (Dortmund, RFT), una linea sospesa in cui la via di corsa è una trave d'acciaio entro la quale scorre un carrello con ruote gommate orizzontali, con motore elettrico tradizionale o ad induzione lineare.

Nella categoria dei sistemi innovativi sono annoverati pure i "mini-metrò", simili per prestazioni alle metropolitane, in sede propria, ma dotati di peculiarità derivate dall'impiego di nuove tecnologie (minori dimensioni delle vetture, automatismo totale, guida su ruote gommate o su cuscino d'aria).

Tra i mini-metrò meritano di essere menzionati:

- l'Airtrans, guidato da computer e flessibile nella capacità di trasporto (composizione automatica di vetture, modifiche di percorso), in funzione nell'aeroporto di Dallas, USA);
- lo Skybus- Transit Expressway (Pittsburgh, USA), simile all'Airtrans, con percorsi tanto in superficie quanto in sotterraneo o in sopraelevata, adatti al superamento di pendenze notevoli o di curve a raggio minimo;
- l'Aerotrains (F), capace di elevate velocità, con veicoli di piccola sagoma viaggianti su cuscino d'aria, con rotaia centrale a cremagliera di guida e di trazione che consente il superamento di notevoli pendenze.

Molto più simili ai sistemi di trasporto individuali per tipo d'uso, si rivelano i Personal Rapid Transit (P.R.T.) a guida vincolata, al servizio di aree ristrette (aeroporti, centri commerciali, ecc.); sono dotati di piccole vetture o cabine che si muovono su sede propria, con accesso diretto per gli utenti in apposite fermate, e con sistema di controllo completamente automatizzato. A questo gruppo appartengono:

- il Poma 2000 (F), in cui le vetture, di piccola dimensione, sono trainate mediante cavo, lungo una pista in calcestruzzo e si muovono su ruote gommate. In corrispondenza delle stazioni le vetture possono staccarsi dal cavo principale, per proseguire su una linea adatta al carico/scarico utenti, con velocità molto ridotta;
- l'Aramis (F), dotato di piccole vetture che si spostano sopra una pista in calcestruzzo, alimentate da energia elettrica fornita mediante rotaia; interessante è la tecnica di derivazione delle vetture in corrispondenza delle stazioni; dal convoglio si staccano automaticamente le vetture con passeggeri che hanno fatto richiesta di fermata, mentre le altre proseguono e si agganciano alle vetture uscenti dalla stazione. La figura x descrive schematicamente questo processo;
- il Cabintaxi (RFT) è simile ad un ascensore orizzontale; la vettura, capace di due soli posti, può essere chiamata ed indirizzata mediante pulsanti. Il percorso è stabilito da computer (minimo percorso) ed è senza fermate intermedie. Il movimento avviene su una trave-viadotto con vetture sia appoggiate, sia sospese, ed è generato da un motore lineare ad alta accelerazione.

1.3 Le prestazioni dei diversi sistemi di trasporto collettivo.

Le prestazioni principali di un sistema di un sistema di trasporto collettivo che in generale vengono prese in considerazione sono:

- capacità di trasporto (numero massimo di passeggeri/ora trasportabili per verso di marcia);
- velocità commerciale, regolarità, sicurezza;
- impatto ambientale (intrusione fisica e visiva, inquinamento acustico e atmosferico, ecc.);
- costi di investimento e di esercizio.

Nella tab 2.3 sono riportate le prestazioni dei sistemi di trasporto urbano.

Le prestazioni ed i costi relativi ad un certo sistema sono determinati principalmente dalla combinazione risultante tra caratteristiche del materiale rotabile, caratteristiche della sede e caratteristiche geometriche del tracciato.

Evidentemente nel parlare di prestazioni occorre considerare che queste possono essere diversamente valutate da operatori, utenti, non-utenti. Anche gli impatti generati dalla realizzazione di un sistema di trasporto collettivo possono essere percepiti in misura e in maniera diversa: l'ottica dell'utente sarà indirizzata soprattutto sui tempi di viaggio, sulla regolarità di servizio, sulla qualità e sicurezza del trasporto; quella dell'operatore anche sui costi e sulla capacità; quella della collettività sull'impatto ambientale; quella dei decisori sul rapporto tra costi e grado di soddisfacimento di esigenze multiple della società; quella dei pianificatori sul rapporto tra sistema di trasporto e sistema territoriale.

Diverse analisi tecnico-scientifiche hanno messo in evidenza l'inesistenza di un solo "ottimo" modo di trasporto collettivo urbano.

Le condizioni e le esigenze per il trasporto urbano variano da città a città, eccetto che per quelle di piccole dimensioni; il sistema di trasporto ottimo è spesso un sistema bilanciato, ovvero un sistema consistente di diversi sottosistemi complementari coordinati in un singolo sistema multimodale.

Tab 2.3 Prestazioni tipiche dei sistemi di trasporto urbano

	AUTOVETTURA	AUTOBUS	TRAM	L.R.T.	METROPOLITANA
Frequenza massima (veicoli/h)	800-1000	60	60	40-60	20-40
Capacità convoglio	5(1.5) ^g	60-120	130-280	230-800	480-2000
Capacità linea (persone/h/verso)	1050-1300 ^g	3600-7200	7000-15000	9000-30000	10000-60000
Velocità esercizio (km/h)	20-50	15-25	12-20	20-45	25-60
Velocità in capacità (km/h)	10-30	6-15	5-13	15-40	24-55
Larghezza via di corsa (m) per trasportare 1500 pax/h/verso	35 ^g	10.5-11.25 ^a	5.5-6.0 ^b	7.50/2	8.00/2
Ranghi convenienza gestionale (posti/h/senso)	-----	<1400÷2000	1500÷2000 4000÷4500	4000÷4500 19000÷20000	>15000÷20000
Costo medio posto*km nel rango (£ '86)	200 ^h	55 - 65 ^c	30 - 45 ^d	32 -42 ^e	27 - 46 ^f

- legenda:
- a Autobus da 90 posti
 - b Tram da 175 posti
 - c 90 posti, 35000-45000 km/anno, cap.punta = 2÷2.5 media giornaliera
 - d 175 posti, 35000-46000 km/anno, cap.punta=2÷2.5 media giornaliera
 - e 600 posti, 25000-30000 km/anno, cap.punta=2÷2.5 media giornaliera
 - f 1300 posti, 8000 km/anno, cap.punta=2÷2.5 media giornaliera
 - g per l'automobile si è utilizzata in tutti i conti una "capacità pratica" di 1.3 persone/veicolo
 - h costo di ammortamento ed esercizio di una FIAT UNO 45, 15000 Km/anno

sedi, veicoli, capacità

2 CARATTERISTICHE DELLE SEDI VIARIE

2.1 Tipologia di infrastrutture viarie.

L'infrastruttura primaria per l'esercizio del trasporto è la sede viaria ovvero il supporto su cui si svolge l'atto dello spostamento.

Il tipo di sede condiziona più di ogni altra caratteristica gli investimenti, l'ambiente, le prestazioni del servizio.

Le categorie di sedi utilizzabili possono essere schematicamente ricondotte alle seguenti:

- a) sede promiscua: i veicoli viaggiano sulla stessa sede di altri veicoli pubblici o privati;
- b) sede riservata: la sede è destinata solo ai veicoli del modo considerato, ma non è impedito l'uso da parte di altri veicoli o l'attraversamento da parte di pedoni;
- c) sede fisicamente protetta: la sede è protetta dagli altri veicoli e dai pedoni; vi sono alcuni incroci, eventualmente semaforizzati, dove i veicoli devono intersecare correnti veicolari o pedonali;
- d) sede completamente protetta: la sede non consente immissioni di altri veicoli o pedoni e non vi sono intersezioni con flussi pedonali e veicolari.

A parità di altre caratteristiche, le prestazioni del sistema in termini di velocità commerciale e di regolarità di marcia sono fortemente influenzate dalla percentuale di lunghezza della linea con tratte soggette ad interferenze; naturalmente, a parità di lunghezza di linea non completamente protetta, gli effetti dipendono dall'entità delle interferenze e quindi dal grado di congestione del traffico con cui la linea interferisce.

I tratti di linea in sede protetta o completamente protetta possono essere realizzati in superficie, in galleria superficiale, in galleria profonda, in viadotto.

Altri caratteri distintivi delle sedi viarie sono riconoscibili nella tecnologia connessa al sistema propulsivo ed all'interazione sede-veicolo. Nel seguito l'attenzione è limitata ai sistemi di trasporto ordinari, in cui il veicolo si muove sfruttando le forze di contatto che si instaurano tra ruote e sede per fenomeni di "aderenza":

- A. i sistemi di trasporto su strade pavimentate, con veicoli dotati di ruote di gomma;
- B. i servizi di trasporto su vie ferrate (binari) con veicoli dotati di ruote di acciaio.

A. Le strade per servizio automobilistico.

Le larghezze standard e minime necessarie per le sedi dei servizi automobilistici sono rispettivamente di mt 3.60 e mt 3.00, anche se si registrano fluttuazioni più o meno ampie da Stato a Stato. Le infrastrutture su cui è prevedibile un'eventuale conversione al trasporto su ferro, non devono necessariamente possedere larghezze maggiori, dato che i mezzi ferroviari richiedono generalmente sedi meno ampie.

I veicoli gommati in servizio ordinario di trasporto collettivo circolano sulle stesse strade dei veicoli privati; in ambiente urbano possono essere previsti per essi delle corsie riservate o trattamenti privilegiati nelle regole di priorità di circolazione.

Una corsia riservata deve avere una larghezza di almeno mt 3.75, e non meno di mt 5.50 ove si preveda la possibilità di sorpasso.

Una via a due corsie riservata alle autolinee sarà larga circa mt 7.50 ove le velocità siano moderate; per servizi a velocità più elevata (freeway) sono necessarie larghezze maggiori e dispositivi di separazione fisica tra le singole corsie.

Una delle ragioni che ostacolano provvedimenti di adozione di corsie per gli autobus su strade urbane è legata a problemi organizzativi: disciplina nel comportamento degli utenti di mezzi privati per evitare invasioni illecite, interferenze tra i flussi in corrispondenza delle intersezioni, posizione della corsia rispetto alle altre, sensi di circolazione, ecc.

La separazione fisica della corsia può essere realizzata, ma a costi sensibilmente più elevati ed a fronte di difficoltà organizzative ancora maggiori.

Le quattro maggiori caratteristiche che possono contraddistinguere una linea riservata ad autobus o trolleybus sono indicate nella Tab. 2.1. Ad ogni caratteristica è associato un livello di valore (d = minimo, β = medio, a = massimo) nel rapporto di privilegio assegnato al servizio di autolinee.

Tab. 2.1 - Caratteristiche distintive di corsie riservate ad autolinee.

	Caratteristiche			
	1	2	3	4
Valore	<i>Livello di separazione</i>	<i>Senso di marcia</i>	<i>Durata</i>	<i>Veicoli accettati</i>
d	corsie a traffico misto	unico	ora di punta	tutti
β	corsie riservate regolari (CRR) o controcorrenti (CRC)	reversibile	ora di punta	bus, veicoli particolari
a	corsie bus esclusive (CE) o protette	doppio	permanente	bus

Caratteristiche e categorie di valori sono descritte qui sommariamente.

Il livello di separazione indica il tipo, il modo ed il grado di separazione della via di corsa del bus; sono distinte le tre classi seguenti:

- corsie a traffico misto; sono quelle più comuni, in cui non è previsto alcun particolare trattamento per gli autobus;
- corsie preferenziali regolari (CRR); sono delimitate da segnali sulla pavimentazione o di altro genere, ma non da barriere fisiche; allo stesso gruppo appartengono pure le corsie preferenziali controcorrente (CRC), cosiddette perché hanno senso di circolazione opposto a quello delle altre corsie; la loro capacità di scoraggiare sconfinamenti da parte di veicoli privati è notevole, ma esistono maggiori difficoltà organizzative e minori livelli di sicurezza;
- corsie ad uso esclusivo (CE), separate da barriere fisiche; sono quelle che garantiscono in misura più elevata, velocità, sicurezza, regolarità.

Il senso di marcia può essere unico, doppio o ancora, reversibile; in quest'ultimo caso il senso di circolazione è comunque uno solo, ma è opposto per fasce orarie diverse.

Il trattamento privilegiato può avere durata limitata nel tempo (il periodo o i periodi di punta) ovvero essere permanentemente in vigore.

Fruitori della corsia privilegiata possono essere esclusivamente gli autobus; ma è possibile prevederne l'uso da parte di altri mezzi, quali per esempio i taxi o autoservizi non regolari.

Un servizio di autolinee può essere definito attraverso una combinazione di caratteristiche [(d, β , a); 1-4]. Un esempio è riportato nella tabella seguente.

Tab. 2.2 – Caratteristiche di un servizio di autolinee

Caratteristiche				Descrizione del servizio
1	2	3	4	
d	a	a	d	Traffico promiscuo su strada ordinaria a senso unico
β	a	β	a	Doppia corsia riservata, per le ore di punta
β	d	d	a	Una corsia preferenziale su una freeway durante un'ora di punta
a	a	a	a	Via di corsa separata e riservata permanentemente al flusso di autobus in entrambe le direzioni

E' evidente comunque che non tutte le combinazioni sono possibili.

La più agevole introduzione di corsie preferenziali per gli autobus si realizza su strade con tre o più corsie per senso di marcia.

La separazione modale riduce la "turbolenza" del traffico e spesso si traduce in aumenti di velocità sia per gli autobus che per le vetture private. In fig.3.1 sono rappresentati diversi tipi di organizzazione distributiva di corsie preferenziali. I casi più frequenti sono quelli di conversione di corsie adibite a parcheggio (P) o a traffico promiscuo in corsie riservate ai bus.

Alcune conformazioni di strade con corsie riservate ad autobus (CRR, CRC, CE) ed intersezioni sono presentate in fig.3.2; le linee di autobus sono in questo caso senza svolte e vengono ad interferire con i flussi di svolta degli autoveicoli privati; sono indicate le dimensioni ottimali delle corsie e delle barriere di separazione, la distribuzione della larghezza di sezione tra le due componenti modali, le regole di coordinamento delle priorità gestite tramite semafori.

Recenti sviluppi hanno condotto alla gestione condizionata dei cicli semaforici: opportuni sensori disposti sulla carreggiata (fig.3.3) o lateralmente ad essa, in grado di riconoscere un veicolo di trasporto pubblico al suo sopraggiungere in un'intersezione, possono modificare le fasi del ciclo in modo da favorirne il deflusso sulla corsia riservata.

B. Le infrastrutture ferroviarie.

Le caratteristiche fisiche di un'infrastruttura ferroviaria sono strettamente legate alla sua posizione verticale; in tal senso si distinguono infrastrutture:

- sopraelevate, attraverso rilevati, viadotti (fig.3.4), ponti;
- a piano campagna, con trattamento privilegiato (sede completamente o parzialmente protetta) o meno;
- in trincea (fig.3.5), ovvero sotto il piano campagna naturale; sono utilizzate per separare i flussi di traffico, per ragioni protettive, per ridurre fenomeni di inquinamento acustico o di intrusione visiva;
- in galleria, ovvero completamente sotterranee; esse possono essere più o meno profonde (figg.3.6,3.7).

Rispetto al grado di separazione della sede, le vie ferrate possono essere distinte nelle categorie R/W A, B, C già definite in precedenza.

L'armamento di tipo tradizionale è costituito da rotaie a scartamento ordinario, traverse (in legno, in conglomerato cementizio armato semplice o precompresso) e ballast (massicciata di pietrame); si va diffondendo, per le ferrovie metropolitane in galleria e in viadotto, il collegamento diretto delle rotaie alla struttura di appoggio, con l'interposizione di materiali

gommosi antivibranti. La riduzione dello strato di appoggio conseguita con la rimozione del ballast, ed in qualche caso anche delle traverse, consente d'altra parte una riduzione della sagoma di eventuali gallerie.

La larghezza della piattaforma ferroviaria varia tra mt 5.50 e mt 6.50 per una linea a semplice binario, tra mt 9.65 e mt 10.25 per una a doppio binario; i maggiori valori si riferiscono alle linee principali ed a tratte in curva. In fig.3.8 sono disegnate due sezioni trasversali tipo di linee ferroviarie.

Le rotaie in acciaio sono caratterizzate in base al loro peso per unità di lunghezza; esse sono saldate in opera e fissate alle traverse mediante caviglie, piastre e bulloni; lo scartamento interno ordinario tra le due rotaie è di mm 1435 in rettilineo. Le traverse sono poste ad interasse di cm 60-70 .

La promiscuità della sede viaria per tram e metropolitane leggere ha spesso favorito l'inserimento delle rotaie entro la pavimentazione stradale; in fig.3.9 sono presentati alcuni esempi tipici di strutture di appoggio di binari in strade urbane.

2.2 Caratteristiche di tracciato

In ambiente urbano le caratteristiche di percorso per un servizio di trasporto collettivo dipendono fortemente dalle tipologie insediative e dalla morfologia territoriale. Evidentemente più facile è l'inserimento di un tracciato automobilistico o ferroviario in aree urbane con tessuto edilizio regolare e segnato da arterie ampie, piuttosto che nel contesto di un centro storico caratteristico di molte città italiane. La possibilità di effettuare manovre agevoli si riduce per i mezzi di trasporto collettivo tanto più quanto più essi sono lunghi, quanto minore è la distanza di visibilità, quanto più strette sono le vie di transito, quanto più contorto risulta l'andamento plano-altimetrico del tracciato.

Il raggio di curvatura interno (alle intersezioni) per un autobus standard che svolta a destra non deve mai essere inferiore ai mt 7.00. Tale valore minimo dev'essere accresciuto in rapporto alle dimensioni dei veicoli (lunghezza e larghezza).

Lo spazio di manovra per un bus autoarticolato può essere invece ridotto in leggera misura, se le vetture componenti hanno dimensioni limitate (fig.3.10).

Autobus e trolleybus possono operare su strade a forti pendenze, purchè in assenza di neve o ghiaccio (a S. Francisco sono superate pendenze del 19%, sia pure con velocità di 2-8 Km/h). Tuttavia, anche per contenere le esalazioni di gas nocivi, si preferisce limitare le pendenze sotto valori di 6-8%.

Il disegno del tracciato ferroviario investe tre aspetti: l'andamento orizzontale (planimetrico), l'andamento verticale (profilo longitudinale) e la sagoma trasversale (ingombro del veicolo in transito). In orizzontale i principali problemi risiedono nelle curvature di tracciato; per ragioni di sicurezza e per garantire prestazioni elevate si tende ad aumentare il raggio di curvatura; d'altra parte, in particolari condizioni quali quelle urbane, può essere necessario il ricorso a raggi di curvatura molto ridotti.

La tecnologia ferroviaria consente di superare pendenze fino al 10%, ma tali casi sono molto rari e si riflettono negativamente sull'esercizio del servizio di trasporto. In generale si distingue fra le pendenze possibili e quelle preferibili; le Ferrovie dello Stato adottano i seguenti limiti di pendenza di linea:

- 0,5-0,8% in pianura;
- 1,5-1,8% in terreni accidentali;
- 2,0-2,5% in montagna.

Nelle curve inoltre si riducono le pendenze in modo da limitare l'incidenza complessiva delle resistenze "accidentali". La Tab. 2.3 riporta per raggi di curvatura e pendenza, i valori limiti fisicamente possibili, i valori più diffusi nei sistemi operanti ed infine quelli consigliati per nuove linee di metropolitana.

Tab. 2.3 - Valori limiti di raggi di curvatura(mt) e pendenze (%) per trasporto urbano su rotaia.

	Fisicamente possibile	In uso	Consigliato per nuove linee
<i>Minimo raggio di curvatura</i>			
Metropolitana	25	27-25	125
Metro leggera	13	20-25	25-50
<i>Massima pendenza</i>			
Metropolitana	6-8	5-6.2	6-6.5
Metro leggera	15	15	8-10

Il profilo trasversale (sezione) di una via ferrata dev'essere tale da garantire il transito libero dei veicoli; esso è determinato in rapporto alle dimensioni del veicolo (larghezza, altezza) ed alla tecnica di trasmissione dell'energia motrice; la sagoma nasce in genere da un compromesso tra le esigenze di garantire condizioni di circolazione libera e quelle di contenere i costi di realizzazione della via di corsa, specialmente in galleria. La sostituzione della captazione di corrente aerea con quella attraverso rotaia per esempio, può favorire la riduzione della sagoma libera e quindi dei costi di scavo (fig.3.11).

2.3 Distanza tra le fermate

Si definisce "copertura spaziale", realizzata da un servizio di Trasporto Collettivo, una fascia territoriale entro cui risulta agevole l'accesso al servizio; essa deriva dalla considerazione che esista una distanza massima che l'utente è disposto a percorrere per accedere al servizio o allontanarsi da esso (vedi Tab. 2.4).

Tab. 2.4 - Tipiche distanze di accesso al servizio di trasporto (Km)

Modalità di accesso	Molti utenti	Pochi utenti
Piedi	0.6-1.0	1.0-1.6
Bicicli	1.6-3.2	3.2-4.8
Motocicli	3.2-6.4	6.4-13.0
Autovettura (taxi)	4.8-6.4	6.4-9.7
Autovettura privata	6.4-9.7	9.7-16.0

Le distanze "di accesso" accettate sono anche influenzate dalla qualità del servizio, dalla disponibilità di alternative, dalle caratteristiche delle vie di accesso, dalla distanza tra le stazioni, ecc.

Generalmente la distanza tra le stazioni (fermate) in ambiente urbano è contenuta tra mt 200 e mt 500 per un servizio di autobus o tranviario, varia tra mt 350 e mt 800 per un sistema di metropolitana leggera, raggiunge i mt 500- 2000 per la metropolitana classica.

Alla distanza tra le stazioni, nonchè alla lunghezza ed al tipo di convoglio, è legata la lunghezza delle banchine di accesso al mezzo pubblico. Sono sufficienti mt 12-40 per servizi

automobilistici, mt 20-70 per servizi tranviari; per metropolitane leggere le lunghezze arrivano a mt 45-100 e per quelle classiche a mt 110-210.

A causa della generale tendenza a ridurre il tempo di viaggio e ad accrescere la velocità e l'uso del veicolo pubblico, la distanza media tra le fermate è stata ampliata, soprattutto in aree metropolitane; alcune ricerche sono state orientate alla determinazione della distanza ottimale tra due stazioni; la fig.3.12 illustra un tipo di risultato ottenuto con un modello di simulazione delle prestazioni di una linea di trasporto collettivo a servizio di un corridoio (Nuzzolo A., Di Gangi M., 1990). Il modello è stato applicato per valutare l'influenza del distanziamento tra le fermate sulle prestazioni del sistema e sul livello di domanda. A tal fine sono state considerate 7 differenti tipologie di linee con distanziamento delle fermate considerato costante per semplicità e variante tra 160 e 800 mt. Sono state altresì considerati due sistemi aventi frequenze di esercizio l'uno la metà dell'altro (6 e 12 conv./h rispettivamente), con capacità dei convogli rispettivamente di 120 e 60 passeggeri, differenziata in maniera tale da mantenere eguale la capacità globale in 7600 passeggeri/ora per entrambi i due sistemi e quindi garantire l'omogeneità dei risultati. Le diverse caratteristiche delle linee adottate sono riassunte nella Tab. 2.5.

Tab. 2.5 – Caratteristiche delle linee adottate nel modello

Linea	1	2	3	4	5	6	7
N. tratte	10	16	20	25	32	40	50
Lungh. tratte (d)	800	500	400	320	250	200	160

Gli indicatori considerati per la valutazione dei diversi sistemi sono la velocità commerciale, il tempo medio di viaggio, la disutilità percepita dall'utente e l'utenza totale della linea. Dall'esame delle figure si nota come l'accorciamento delle tratte induce una diminuzione della velocità commerciale causata dal maggior numero di arresti; per quel che riguarda la disutilità, il suo andamento rivela un minimo in corrispondenza di $d = 250$ mt, mentre si ha un tempo di viaggio minimo in corrispondenza di $d=400$ mt a cui corrisponde il valore massimo del livello di domanda.

E' interessante notare che, nell'esempio trattato, l'accorciamento delle tratte, oltre un certo limite, provoca un peggioramento delle condizioni di funzionamento del sistema sia per l'utente che per l'azienda.

3 CARATTERISTICHE DEI VEICOLI DI TRASPORTO PUBBLICO

3.1 Introduzione

Veicolo trasportatore è il mezzo che realizza lo spostamento di persone e cose nello spazio, muovendosi sulla rete viaria; casi limite sono quelli del "marciapiede mobile" o "tapis roulant", in cui la sede viaria è essa stessa veicolo, e dell'uomo che si sposta a piedi o trasporta oggetti, agendo da veicolo.

La tecnologia ha prodotto veicoli molto diversi e per esigenze assai variegata, per cui non risulta agevole una classificazione univoca; si procede in genere a distinguere i mezzi di locomozione in rapporto:

- alla dimensione e capacità di carico;
- alle prestazioni tecnologiche e cinematiche.

3.2 Dimensioni e capacità dei veicoli.

Valori tipici circa dimensioni e capacità dei veicoli di trasporto pubblico sono riportati nella tabella 4.1. Lunghezza e larghezza sono "esterne", l'altezza è misurata dalla sede viaria alla copertura.

La larghezza di un posto a sedere è generalmente di m 0.4-0.6 , con misure di m 0.45-0.50 tipiche per veicoli usati in aree locali e ad elevata densità di servizio. La distanza tra due posti in fila è di m 0.65- 0.85 .

Si può rilevare in definitiva che ciascun posto occupa da mq 0.27 a 0.53 (mq 0.3 - 0.4 per servizi locali).

I posti sono in genere distribuiti in relazione alle dimensioni del mezzo. Un maggior numero di posti può comportare minore comfort o comunque minore libertà di movimento per i passeggeri all'interno del veicolo.

L'area necessaria per un passeggero in piedi può ridursi fino a un minimo di mq 0.15 (periodi di punta); tuttavia è conveniente che essa non scenda sotto mq 0.25 - 0.37 .

Generalmente lo spazio minimo necessario per il passaggio degli utenti tra i posti a sedere è di m 0.53 - 0.80 ed è situato in mezzo alle file dei posti a sedere.

Su molti veicoli pubblici la larghezza delle aperture per carico/scarico passeggeri varia da m 0.55 a 0.75 per canale di flusso, con il valore più alto per servizi locali.

La capacità di trasporto di un veicolo può essere ricavata a partire dall'area di base A_g (lunghezza x larghezza) e sottraendo ad essa un'aliquota del 5-10% (A_l) per tener conto dello spazio occupato dalla carrozzeria del mezzo con relativi accessori, dello spazio occupato dal conducente e da eventuali altri operatori, dello spazio che dev'essere tenuto libero per motivi di sicurezza. L'area netta risultante ($A_n = A_g - A_l$) può essere divisa tra posti a sedere (w_s) e posti in piedi (w_p) sulla base del rapporto tra le aree relative stabilito in congruenza con il livello di servizio che si vuole realizzare.

Il rapporto posti seduti/posti in piedi definisce la capacità reale del veicolo; dato che lo spazio occupato da un posto seduto è 1.5-3 volte quello di un posto in piedi, maggiore è tale rapporto, maggiore è la capacità del veicolo ($w = w_s + w_p = w_p(1 + w_s/w_p)$). Le figg.4.1 e 4.2 mostrano diverse possibili organizzazioni distributive degli spazi interni ai veicoli.

Definiti con d e s gli standards di comfort rispettivamente per utenti seduti ed utenti in piedi (in mq/posto), si può scrivere:

$$A_n = w_s d + w_p s \quad [\text{mq}]$$

Ponendo $w_p = w - w_s$, risulta:

$$A_n = w_s d + (w - w_s) s$$

e dunque:

$$w = w_s + \frac{A_n - w_s d}{s}$$

Questa relazione esprime la capacità del veicolo in funzione del numero di posti a sedere, delle dimensioni del veicolo e degli standards di comfort.

Si può introdurre inoltre un nuovo concetto, quello di coefficiente di capacità veicolare:

$$c_w = \frac{w}{A_n} \quad [\text{posti/mq}]$$

ovvero una misura di densità media dell'offerta di posti. In altri termini:

$$c_w = \frac{w_s + \frac{A_n - w_s d}{s}}{A_n} = \frac{w_s}{A_n} \left(1 - \frac{\delta}{\sigma} \right) + \frac{1}{\sigma} \quad (1)$$

Il diagramma in fig.4.3 mette in relazione, sulla base dell'equazione (1), gli indicatori di comfort d e s con le capacità del veicolo. Le due capacità per unità d'area, totale ($c_w = w/A_n$) e a sedere (w_s/A_n), sono le variabili in ordinata ed ascissa rispettivamente. L'ordinata indica la capacità unitaria in termini di soli posti in piedi, mentre la capacità unitaria in termini di soli posti a sedere è indicata dai punti posti sulla bisettrice. I valori tipici di d e s sono individuati rispettivamente sull'ordinata e sulla bisettrice). Una famiglia di linee che associa a coppie i valori di d e s traduce la relazione (1) tra i due parametri. Prefissati w_s e A_n , si può calcolare il rapporto w_s/A_n e, tirando una verticale per tale valore in ascissa, si può ottenere l'intersezione con la linea che accoppia due standard d e s ; in corrispondenza di tale punto, in orizzontale, si legge il valore del coefficiente c_w e si ottiene in definitiva la capacità complessiva del veicolo $w = c_w A_n$.

L'abaco risulta limitato in pratica nel suo dominio: in ogni veicolo è prevista una minima capacità di posti a sedere ($w_s = 0.1 w$) ed una riduzione della capacità utile di posti in piedi per necessità di garantire spazi di circolazione per i passeggeri in vettura ($s = w_p = 0.20 A_n$).

3.3 Prestazioni cinematiche e tecnologiche

Le prestazioni dei veicoli sono ampiamente descritte in testi di meccanica della locomozione. Si richiamano qui alcune di esse, con alcune precisazioni ed informazioni significative.

Le prestazioni cinematiche dei veicoli sono largamente dipendenti da quelle tecnologiche (sistema di propulsione, peso, aerodinamica), ma dipendono anche da fattori di servizio (per es. tempi spesi per fermate), caratteristiche di percorso (tortuosità, pendenze,...) e di traffico (per es. congestione per i veicoli viaggianti in sede promiscua, distanze di sicurezza interveicolari per mezzi in sede riservata).

I massimi valori di accelerazione e jerk (contraccolpo) per un normale servizio di trasporto pubblico sono legati alla tolleranza dei passeggeri in piedi che non abbiano appigli cui aggrapparsi. Il controllo del jerk entro certi limiti è fondamentale, ma anche quello dell'accelerazione è importante.

Valori di accelerazione limiti sono m/s^2 1.3-1.6 ; per il jerk si può fare riferimento a valori di m/s^3 0.9. E' tuttavia preferibile limitare accelerazione e jerk a valori ancora più bassi.

I veicoli di trasporto collettivo sono soggetti a fermate più frequenti di molti altri tipi di veicoli. Gli sforzi di trazione e di frenatura in tali operazioni sono di notevole importanza. L'aderenza tra le ruote del veicolo e la sede viaria determina il valore limite degli sforzi suddetti. Per produrre il massimo sforzo di trazione, i moderni mezzi di trasporto pubblico sono provvisti di assi tutti motori, anche se esistono i convogli con carri trainati.

Le velocità cui usualmente si fa riferimento per i mezzi di trasporto pubblico sono:

- velocità massima (che il veicolo è capace di realizzare con carico tutto seduto, su una tratta);
- velocità media (è la velocità di servizio su un percorso che risulta dalla considerazione dei perditempo per fermate e per congestione);
- velocità commerciale (velocità di servizio derivante dall'ulteriore inclusione dei tempi spesi ai terminali).

Le operazioni di carico/scarico utenti alle fermate possono influenzare notevolmente la velocità media; i minimi tempi ed i massimi flussi di ascesa/discesa sono ottenuti con banchine rialzate e servizio di biglietteria programmato in anticipo.

La tabella 4.2 mostra i valori tipici di velocità massima e commerciale per differenti tipi di veicoli di trasporto pubblico.

La tabella 4.3 riporta invece pesi tipici dei veicoli più comuni; essa riporta anche il rapporto peso/carico passeggeri; è questa una misura di efficienza, perchè l'energia spesa per la propulsione dipende notevolmente dal peso del veicolo e dal suo carico.

Il confronto dell'efficienza energetica tra diversi tipi di tecnologie veicolari è molto difficile. Esso deve considerare un ampio spettro di fattori influenti ed inoltre i consumi vanno rapportati a misure di produttività (per es. passeggeri*km).

Tab 4.1 Dimensioni e capacità dei veicoli di trasporto collettivo

Veicolo	Lung.(m)	Largh.(m)	Alt. (m)	Posti per veicolo			Capacità Convoglio	
				Seduti	In piedi	Totale	Carri	Tot. utenti
Furgone	4.5-5.5	1.7-2.2	2.0-2.8	10-16		10-16		
Minibus	5.5-7.6	2.0-2.4	2.3-3.0	15-25	0-15	15-40		
Bus								
Singola unità	7.6-12.2	2.3-2.6	2.8-3.4	30-55	10-75	40-115		
Articolato	16.5-18.3	2.4-2.6	2.9-3.2	35-75	30-125	95-185		
Doppia alt.	9.1-12.2	2.3-2.6	4.0-4.4	50-85	15-50	90-130		
Tram								
Singola	12.2-16.8	2.0-2.7	3.0-3.4	20-60	40-80	75-130	3	225-400
Articolato	18.3-27.4	2.3-2.9	2.0-3.4	30-85	120-200	100-275	3	300-825
Treno								
Urbano	13.7-23.0	2.6-3.4	3.0-4.0	40-85	50-250	100-330	8-10	1000-2700
Regionale	20-26	3.0-3.2	3.7	80-110	20-120	100-200	10	1000-2000
Doppia alt.	20-26	3.0-3.2	4.3-4.8	110-165	20-150	160-270	10	1600-2700

Tab 4.2 Tipiche velocità (massime e commerciali) per veicoli di Trasporto Collettivo

Veicolo	V _{max} (Km/h)	V _{com} (Km/h)
Bus urbano	80-105	13-23
Tram	65-95	13-25
Metropolitana	80-110	25-55
Treno	100-160	40-105

Tab 4.3 Pesi veicolari tipici

Veicolo	Peso a vuoto (ton)	Peso per passeg. trasportato (kg)
Furgone	2.3 - 3.4	90 - 300
Minibus	3.1 - 7.7	90 - 320
Bus semplice	6.3 - 12	80 - 155
Bus articolato	13.0 - 16.0	75 - 165
Bus bipiano	6.8 - 13.0	90 - 105
Tram semplice	16.0 -24.0	145 - 260
Tram articolato	20.0 - 50.0	115 - 267
Treno	16.0 - 42.0	90 - 225

Scheda di identificazione di un veicolo di T. C.

VEICOLO TIPO per Metropolitana [UMTA]	
Lunghezza totale	22.80 m
Larghezza	2.97 m
Altezza interna	2.24 m
N. porte per lato	4
Larghezza delle porte	1.27 m
Altezza delle porte	1.92 m
Posti a sedere	62
Totale posti	150
Peso a vuoto	41 t
Peso nominale	51 t
Livello rumorosità interna	63 dBA
Livello rumorosità est. (15 m. dal veicolo)	73 dBA

4 CAPACITA' DI UNA LINEA DI TRASPORTO

4.1 Capacità teorica della linea

Una definizione molto generale di capacità di linea è quella di massimo numero di unità di traffico (TU) che possono transitare su una linea di trasporto collettivo, in un intervallo temporale di riferimento (es. un'ora) sotto determinate condizioni.

L'unità di traffico è costituita da un insieme di n carri raggruppati insieme o, al limite, da un singolo veicolo (n=1).

Se h è il distanziamento temporale in secondi tra due unità di traffico successive in linea, il suo reciproco rappresenta una portata veicolare:

$$Q = \frac{3600}{h} \quad [\text{TU/h}]$$

Una definizione più precisa della capacità può essere fatta allora in rapporto al valore del distanziamento temporale minimo tra due TU;

$$Q_{\max} = \frac{3600}{h_{\min}} \quad [\text{TU/h}]$$

Se h_w è il distanziamento temporale sulla tratta e h_s è il distanziamento temporale tra due TU successive in stazione (intervallo tra due partenze successive):

$$Q_{\max} = \frac{3600}{\text{Max}(h_{w_{\min}}, h_{s_{\min}})} \quad [\text{TU/h}]$$

In molti casi $h_{s_{\min}} > h_{w_{\min}}$, cosicchè il distanziamento tra le stazioni determina la capacità di linea.

La capacità può essere espressa in vetture/ora; se n è il numero medio di vetture componenti una TU:

$$C = Q_{\max} n \quad [\text{vett./h}]$$

Per un servizio di autobus ($n=1$):

$$C = Q_{\max}$$

Ancora, la capacità può essere espressa in utenti/ora:

$$V_c = w Q_{\max} n = \frac{w n 3600}{h_{\min}}$$

avendo indicato con w la capacità della singola vettura.

Se V_{cw} e V_{cs} sono rispettivamente la capacità di tratta e di stazione:

$$V_{cw} = \frac{w n 3600}{h_{w_{\min}}}$$

$$V_{cs} = \frac{w n 3600}{h_{s_{\min}}}$$

allora la capacità della linea sarà:

$$V_c = \text{Min}(V_{cw}, V_{cs})$$

I distanziamenti temporali $h_{w_{\min}}$ e $h_{s_{\min}}$ dipendono da diversi fattori e non sono sempre costanti; $h_{w_{\min}}$ dipende da performances del veicolo e regime di viaggio, ma soprattutto dal

grado di separazione R/W; h_{smin} dipende in più dalle procedure di carico/scarico passeggeri e di controllo di tali operazioni.

4.2 Capacità di tratta

Il distanziamento temporale minimo su una tratta può essere determinato quale rapporto tra distanziamento spaziale minimo tra due TU e velocità media di transito:

$$h_{w_{min}} = \frac{d_{w_{min}}}{v}$$

laddove il distanziamento spaziale minimo è somma della minima distanza di separazione e sicurezza d_{gmin} tra le due TU e della lunghezza media della TU; quest'ultima, a sua volta, può essere espressa come prodotto della lunghezza l_1 di una vettura per il numero n di vetture componenti il convoglio; sicchè:

$$h_{w_{min}} = \frac{d_{g_{min}} + n l_1}{v}$$

ed allora la capacità risulta:

$$V_{cw} = \frac{(3600 n w) v}{d_{g_{min}} + n l_1} \quad [\text{ut/h}]$$

Indicando con p la capacità per unità di lunghezza del veicolo ($p = w/l_1$):

$$V_{cw} = \frac{3600 \pi v}{1 + \frac{d_{g_{min}}}{n l_1}}$$

Per velocità e livelli di sicurezza prefissati, V_{cw} è funzione lineare di p ; essa cresce inoltre con le dimensioni dei veicoli.

Un pò d'attenzione merita la definizione della distanza d_{gmin} , ovvero della separazione minima di sicurezza tra due unità di transito successive; nell'ipotesi più cautelativa:

$$d_{gmin} = s_2 - s_{f1}$$

con

- s_{f1} , spazio percorso in frenatura dal veicolo che precede;
- s_2 , distanza necessaria per l'arresto del veicolo che segue.

Quest'ultima quantità si può considerare composta di tre aliquote:

$$s_2 = s_r + s_{f2} + s_o$$

con

- s_r spazio percorso, nel tempo di reazione t_r , a velocità di regime ($s_r = v t_r$);
- s_{f2} spazio di frenatura, inversamente proporzionale alla decelerazione ($v^2/(2a)$);
- s_o spazio precauzionale per tener conto di variazioni nelle condizioni di frenatura.

In definitiva:

$$d_{g_{min}} = t_r v_2 + \frac{v_2^2}{2a_2} + s_o - \frac{v_1^2}{2a_1} \quad [m]$$

Ponendo in via semplificativa $v_1 = v_2 = v$:

$$d_{g_{min}} = v t_r + \frac{a_1 - a_2}{a_1 a_2} * \frac{v^2}{2}$$

Da tale espressione si ricavano in forma esplicita h_{wmin} e V_{cw} .

4.3 Capacità di stazione

Per una stazione "on-line", ovvero una stazione in cui la sosta di un convoglio impedisce il transito del convoglio successivo, tipo metropolitana, la capacità di stazione è condizionata da fattori legati al sistema di circolazione e di segnalamento (sicurezza); il distanziamento temporale minimo è pari alla somma di un tempo di ingresso in stazione e di un tempo necessario per la sosta di servizio agli utenti:

$$h_{smin} = t_m + t_s$$

Il tempo di sosta dipende dal tipo di servizio, dal tipo di banchine e da altri fattori; si aggira tra 5 e 60 secondi per servizi bus, tra 7 e 30 secondi per servizi di metropolitana.

Il tempo di ingresso a sua volta può essere determinato come somma di un tempo necessario perchè il treno precedente liberi la stazione e di un tempo necessario perchè il treno seguente, ipotizzato fermo in attesa all'ingresso, entri e si fermi in stazione. Nell'ipotesi che la lunghezza delle banchine sia uguale a quella del convoglio, che accelerazione in avviamento e decelerazione in frenatura siano uguali e costanti, e trascurando il contraccolpo, le due aliquote possono essere calcolate nel modo seguente:

tempo per liberare la stazione:

ponendo lo spazio di avviamento pari alla lunghezza della banchina

$$s = \frac{a t^2}{2} = n l_1 \quad \text{si ottiene} \quad t_{m1} = \sqrt{\frac{2 n l_1}{a}}$$

tempo per entrare in stazione:

ponendo lo spazio percorso con una fase di accelerazione ed una di frenatura immediatamente successiva (diagramma di marcia triangolare) pari alla lunghezza della banchina

$$s = \frac{a t^2}{4} = n l_1 \quad \text{si ottiene } t_{m2} = 2\sqrt{\frac{n l_1}{a}}$$

In ultima analisi:

$$t_m = t_{m1} + t_{m2} = (2 + \sqrt{2}) * \sqrt{\frac{n l_1}{a}}$$