



Trasporti e città

Mobilità e pianificazione urbana

- Offerta di trasporto per la mobilità urbana
- Interazioni tra sistemi di trasporto e città
- Sostenibilità nella pianificazione dei trasporti

Giulio Maternini, professore straordinario,
Università di Brescia

Salvatore Amoroso, professore ordinario,
Università di Palermo

Luca Barbarossa, ass. di ricerca,
Università di Catania

Roberto Busi, professore ordinario,
Università di Brescia

Margherita Cadei, ass. di ricerca,
Università di Brescia

Agostino Cappelli, professore ordinario,
IUAV di Venezia

Sergio Copiello, ricercatore,
IUAV di Venezia

Pierluigi Coppola, professore ass.,
Università "Tor Vergata" di Roma

Bruno Dalla Chiara, professore ass.,
Politecnico di Torino

Francesco Deflorio, ricercatore,
Politecnico di Torino

Demetrio Carmine Festa, professore ordinario,
Università della Calabria

Silvia Foini, funzionario,
Comune di Brescia

Paolo Gandini, dottorando
e ass. di ricerca,
Politecnico di Milano

Matteo Ignaccolo, professore ass.,
Università di Catania

Giuseppe Inturri, ricercatore,
Università di Catania

Paolo La Greca, professore ordinario,
Università di Catania

Roberto Maja, professore associato,
Politecnico di Milano

Giovanna Marchionni, ricercatore,
Politecnico di Milano

Agostino Nuzzolo, professore ordinario,
Università "Tor Vergata" di Roma

Umberto Petruccelli, professore ass.,
Università della Basilicata

Michele Pezzagno, ricercatore,
Università di Brescia

Ivano Pinna, assegnista di ricerca,
Politecnico di Torino

Marco Ponti, dottorando
e assegnista di ricerca,
Politecnico di Milano

Elena Rubulotta, assegnista di ricerca,
Università di Catania

Giuseppe Salvo, professore associato,
Università di Palermo

Stefano Stanghellini, professore ordinario,
IUAV di Venezia

Luca Studer, ricercatore,
Politecnico di Milano

Maurizio Tira, professore ordinario,
Università di Brescia

Pietro Zito, ricercatore,
Centro ricerche ENEA di Frascati

www.egaf.it

ISBN 978-88-8482-545-2



9 788884 825452

€ 38,00



Trasporti e città

A cura di Giulio Maternini



egaf



INGEGNERIA DEI TRASPORTI

Trasporti e città

Mobilità e pianificazione urbana

A cura di Giulio Maternini

egaf



Collana

INGEGNERIA DEI TRASPORTI

Direttore scientifico

Giovanni Corona

Comitato scientifico

Agostino Cappelli, Bruno Dalla Chiara
Demetrio Festa, Luigi La Franca
Gabriele Malavasi, Giulio Maternini
Stefano Ricci, Paolo Ritossa





Trasporti e città

Mobilità e pianificazione urbana

CURATORE

Giulio Maternini

AUTORI

Salvatore Amoroso
Luca Barbarossa
Roberto Busi
Margherita Cadei
Agostino Cappelli
Sergio Copiello
Pierluigi Coppola
Bruno Dalla Chiara
Francesco Deflorio
Demetrio Carmine Festa
Silvia Foini
Paolo Gandini
Matteo Ignaccolo
Giuseppe Inturri
Paolo La Greca
Roberto Maja
Giulio Maternini
Giovanna Marchionni
Agostino Nuzzolo
Umberto Petruccelli
Michele Pezzagno
Ivano Pinna
Marco Ponti
Elena Rubulotta
Giuseppe Salvo
Stefano Stanghellini
Luca Studer
Maurizio Tira
Pietro Zito

egaf





EGAF EDIZIONI srl

Via F. Guarini 2 • 47121 Forlì (FC)
Tel. 0543/473347 - Fax 0543/474133
gruppo@egaf.it
www.egaf.it

© 2014 Egaf Edizioni srl
Proprietà letteraria riservata.
Vietata la riproduzione, la memorizzazione
o la trasmissione, anche parziale.

Prima edizione febbraio 2014
ISBN 978-88-8482-556-8

Egaf Edizioni srl e gli Autori,
pur assicurando la massima attenzione
nella redazione dei testi, non rispondono
di eventuali danni causati dall'uso
del loro contenuto.

Saranno gradite tutte le segnalazioni
e le indicazioni utili
che i lettori vorranno inviarci,
di cui si terrà conto
per le prossime edizioni.

Gli scritti riflettono esclusivamente
le opinioni degli Autori e non impegnano
in alcun modo gli Enti
di cui essi siano dipendenti.

Finito di stampare nel febbraio 2014
presso la tipografia
Filograf Litografia srl
Forlì (FC)





INDICE SINTETICO

■ A OFFERTA DI TRASPORTO PER LA MOBILITÀ URBANA

A1 Rapporti tra la pianificazione urbanistica e territoriale e l'ingegneria dei trasporti

Roberto Busi

A2 Urbanistica e mobilità: integrazione nella pianificazione

Roberto Busi

A3 Classificazione dei sistemi di trasporti tradizionali, non convenzionali ed innovativi

Agostino Cappelli

A4 Classificazione delle infrastrutture stradali

Giulio Maternini, Silvia Foini

A5 Elementi di ingegneria del traffico

Umberto Petruccelli (A5.1÷A5.6) Giuseppe Salvo (A5.7)

A6 Determinazione dei livelli di servizio in area urbana

Luca Studer (A6.1), Paolo Gandini (A6.1), Giulio Maternini (A6.2÷A6.3), Margherita Cadei (A6.2÷A6.3)

A7 Tecniche di moderazione del traffico

Michèle Pezzagno (A7.1), Giulio Maternini (A7.2÷A7.4)

A8 Reti di trasporto e assetto del territorio

Demetrio C. Festa

A9 Vulnerabilità delle reti stradali

Roberto Maja, Giovanna Marchionni, Marco Ponti

A10 Strumenti per la raccolta dei dati di traffico

Bruno Dalla Chiara (A10.1÷A10.6),
Francesco Deflorio (A10.1÷A10.6),
Ivano Pinna (A10.1÷A10.6), Giulio Maternini (A10.7),
Margherita Cadei (A10.7), Roberto Maja (A10.8)

■ B INTERAZIONI TRA SISTEMI DI TRASPORTO E CITTÀ

B1 Classificazione delle esternalità nei trasporti

Agostino Cappelli

B2 Accessibilità e localizzazione delle attività nelle aree urbane

Agostino Nuzzolo, Pierluigi Coppola

B3 Periferie e città: strumenti di mobilità per l'inclusione sociale

Salvatore Amoroso

B4 Sistemi di trasporto e plusvalenza delle aree

Stefano Stanghellini, Sergio Copiello

B5 Incidentalità stradale

Margherita Cadei (B5.1), Giulio Maternini (B5.1÷B5.2),
Maurizio Tira (B5.3)



■ **C SOSTENIBILITÀ NELLA PIANIFICAZIONE DEI TRASPORTI**

C1 Pianificazione dei trasporti per la mobilità sostenibile

Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Elena Rubulotta

C2 Approcci e strumenti per la mobilità sostenibile

Matteo Ignaccolo (C2.1÷C2.5), Giuseppe Inturri (C2.1÷C2.5),
Elena Rubulotta (C2.1÷C2.5), Bruno Dalla Chiara (C2.6),
Ivano Pinna (C2.6)

C3 Verso un nuovo modello di pianificazione dei trasporti

Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Elena Rubulotta

**C4 Integrazione tra pianificazione urbanistica e dei trasporti.
Nuovi orientamenti per il progetto della città sostenibile**

Paolo La Greca, Luca Barbarossa

C5 Indicatori per caratterizzare la sostenibilità di politiche di mobilità

Giuseppe Salvo, Pietro Zito



NOTE BIOGRAFICHE

DIRETTORE SCIENTIFICO

Giovanni Corona

Già Professore Ordinario di Trasporti, Università degli Studi di Cagliari, Presidente della società di trasporto pubblico locale di Cagliari (CTM S.p.A.)

COMITATO SCIENTIFICO

Agostino Cappelli

Professore Ordinario di Trasporti presso il Dipartimento di Culture del Progetto (DCP), Iuav di Venezia.

Bruno Dalla Chiara

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino.

Demetrio Carmine Festa

Professore Ordinario in Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria.

Luigi La Franca

Già Professore associato di trasporti, Università degli Studi di Palermo.

Gabriele Malavasi

Professore Ordinario di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Giulio Maternini

Professore Straordinario di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Stefano Ricci

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Gian Paolo Ritossa

Già Professore Ordinario di Trasporti Navali, Università degli Studi di Cagliari.

AUTORI

Salvatore Amoroso

Professore Ordinario di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università degli Studi di Palermo.

Luca Barbarossa

Assegnista di ricerca, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Università degli Studi di Catania.





NOTE BIOGRAFICHE

Roberto Busi

Professore Ordinario di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Margherita Cadei

Assegnista di ricerca, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Agostino Cappelli

Professore Ordinario di Trasporti presso il Dipartimento di Culture del Progetto (DCP), Iuav di Venezia.

Sergio Copiello

Ricercatore di Estimo, Dipartimento Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi, Università IUAV di Venezia.

Pierluigi Coppola

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

Bruno Dalla Chiara

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino.

Francesco Deflorio

Ricercatore di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino.

Demetrio Carmine Festa

Professore Ordinario in Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria.

Silvia Foini

Funzionario tecnico presso il Comune di Brescia.

Paolo Gandini

Dottorando e assegnista di ricerca, Laboratorio Mobilità e Trasporti, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.

Matteo Ignaccolo

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Università degli Studi di Catania.

Giuseppe Inturri

Ricercatore di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Università degli Studi di Catania.

Paolo La Greca

Professore Ordinario di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Università degli Studi di Catania.

Roberto Maja

Professore Associato di Trasporti, Laboratorio Mobilità e Trasporti, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.



**Giulio Maternini**

Professore Straordinario di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Giovanna Marchionni

Ricercatore di Trasporti, Laboratorio Mobilità e Trasporti, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.

Agostino Nuzzolo

Professore Ordinario di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

Umberto Petruccelli

Professore Associato di Trasporti, Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata.

Michèle Pezzagno

Ricercatore di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Ivano Pinna

Assegnista di ricerca, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino.

Marco Ponti

Dottorando e assegnista di ricerca, Laboratorio Mobilità e Trasporti, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.

Elena Rubulotta

Assegnista di ricerca, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Università degli Studi di Catania.

Giuseppe Salvo

Professore Associato di Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università degli Studi di Palermo.

Stefano Stanghellini

Professore Ordinario di Estimo, Dipartimento di Progettazione e pianificazione in ambienti complessi, Iuav di Venezia.

Luca Studer

Ricercatore di Trasporti, Laboratorio Mobilità e Trasporti, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.

Maurizio Tira

Professore Ordinario di Tecnica e pianificazione urbanistica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), Università degli Studi di Brescia.

Pietro Zito

Ricercatore, Centro Ricerche ENEA di Frascati.





NOTA DELL'EDITORE

Egaf entra nel mondo universitario in punta di piedi, una quindicina di anni fa, grazie a una collaborazione con l'Università di Brescia, Facoltà di Ingegneria, per un corso annuale sulle tematiche delle strade e dei trasporti di cui viene parallelamente edito un volume con i contributi dei vari relatori. Questo rapporto, molto stimolante anche dal punto di vista umano, grazie alle squisite persone di riferimento, ha consentito a Egaf di conoscere e farsi conoscere da numerosi docenti del settore delle principali università italiane.

Da questa conoscenza, e stima reciproca, ha origine il salto di qualità costituito dal progetto della collana Ingegneria dei trasporti, per disegnare un quadro aggiornato su sviluppi tecnologici, possibilità applicative, sistemi organizzativi e gestionali, interventi infrastrutturali e criteri di verifica nell'ampio e differenziato settore dei trasporti.

La collana ha lo scopo di saldare le conoscenze scientifiche, proprie dell'ambito universitario, con le esigenze di approfondimento del mondo imprenditoriale e di management del settore, sia privato sia pubblico e in ciò risiede il senso del coinvolgimento di Egaf, che storicamente si rivolge al mondo professionale.

Questo terzo volume della collana, "Trasporti e città", sebbene affronti tematiche già approfondite in numerose pubblicazioni EGAF, risulta innovativo nel trattare in modo organico e sistematico le problematiche di integrazione tra la pianificazione della mobilità e quella urbanistica.

Il testo, proponendo lo stato dell'arte della ricerca consolidata sul tema della mobilità in relazione alla città e al territorio, intende stimolare un nuovo approccio culturale per una aggiornata "Tecnica della mobilità urbana".

Si ritiene, pertanto, che questo testo possa essere utile non solo in ambito di formazione universitaria, corsi di lauree magistrali, dottorati di ricerca e master, ma anche ad imprenditori, management e funzionari del variegato mondo del trasporto, pubblico e privato.





PREFAZIONE DEL DIRETTORE DELLA COLLANA

Nell'arco di un certo numero di mesi non si è di certo modificato quanto riportato nella Prefazione del primo volume della collana di "Ingegneria dei Trasporti", "ITS nel trasporto stradale", dato alle stampe nel marzo 2013 e che riguardava, in estrema sintesi, le problematiche generali dei trasporti e la collocazione degli studi sugli stessi trasporti nell'ambito dell'Università.

Con questo terzo volume prosegue la pubblicazione della collana "Ingegneria dei trasporti", quasi una fotografia di ciò che i trasporti sono al giorno d'oggi e delle tendenze evolutive in essere. Una collana che intende fornire un quadro aggiornato sugli sviluppi tecnologici, sulle possibilità applicative, sui sistemi organizzativi e gestionali, sulla necessità di interventi infrastrutturali e su metodi e criteri di dimensionamento e verifica nell'ampio e differenziato settore dei trasporti.

Il progetto è scaturito dal desiderio di numerosi docenti e ricercatori di Trasporti di molte università italiane, prevalentemente delle Facoltà d'Ingegneria (ora ex Facoltà), che si possono identificare con la denominazione di Gruppo Venezia, di sopperire ad una carenza di testi sistematici ed organici. Il Gruppo Venezia prende il nome da un convegno di alcuni anni orsono, nella città lagunare al quale parteciparono numerosi docenti e ricercatori della disciplina trasporti delle Facoltà di Ingegneria. Già nel 2005 si iniziò a discutere sulle trasformazioni, intervenute nel tempo, del fenomeno del trasporto e, conseguentemente, della disciplina dei trasporti. In particolare la discussione si accentrò sull'oggetto dell'insegnamento e della ricerca, molto differenziato tra le diverse facoltà, ed ancora sul ruolo della docenza dei trasporti sia in ambito accademico, sia in ambito esterno: mondo delle professioni, della pubblica amministrazione, della produzione e dei servizi.

Da tutti questi contatti, in presenza e a distanza, personali e collegiali, è alla fine scaturita l'idea di realizzare la collana Ingegneria dei trasporti, con particolare enfasi sulla trattazione delle innovazioni tecnologiche, ma anche affrontando il tema di gestione ed esercizio dei sistemi.

Potrebbe sembrare anacronistica l'esigenza di voler procedere ad una trattazione sistematica dell'ingegneria dei trasporti, suddivisa per grandi temi, trasporti ferroviari, trasporti stradali, ITS, trasporto pubblico locale, ecc., in quanto allo stato attuale è facilmente consultabile la letteratura specialistica su qualunque argomento anche di grande dettaglio. Tuttavia, proprio l'estrema parcellizzazione delle conoscenze, sia nel settore tecnologico sia in quello gestionale, spesso rende difficile affrontare problematiche che richiedono conoscenze più ampie di quelle puramente settoriali, ed ancora risulta molto oneroso anche per lo studioso, così come per il professionista, per il tecnico dell'amministrazione o dell'azienda e per lo studente, addentrarsi in campi molto specialistici. Lo sforzo di quest'opera è proprio quello di produrre delle esposizioni di argomenti anche specialistici inquadrati però in un ambito conoscitivo generale ed indirizzando i lettori, che ne avessero la necessità, verso gli studi, i testi, le realtà conoscitive di maggiore dettaglio.

I volumi della collana sono rivolti a studenti, docenti, professionisti, industriali e fornitori di servizi, gestori dei trasporti e funzionari pubblici.

Nell'Introduzione al secondo volume "Ingegneria dei sistemi ferroviari", presentato nel gennaio di quest'anno, si osservava come essendosi rafforzata nell'arco di meno di un anno la partecipazione di docenti e di esperti e visto l'entusiasmo con cui da parte di tante sedi universitarie si è aderito all'iniziativa per la realizzazione di questa collana, i promotori iniziali e tutto il gruppo dei docenti impegnati nell'opera hanno deciso di estendere le responsabilità e l'impegno per il lavoro nominando un comitato scientifico e un direttore della collana.

Il comitato scientifico è costituito dai promotori della collana e dai coordinatori dei diversi volumi già realizzati o programmati e cioè Agostino Cappelli dello IUAV





PREFAZIONE DEL DIRETTORE DELLA COLLANA

di Venezia, Giovanni Corona dell'Università di Cagliari, Bruno Dalla Chiara del Politecnico di Torino, Demetrio Festa dell'Università della Calabria, Luigi La Franca dell'Università di Palermo, Gabriele Malvasi della Sapienza Università di Roma, Giulio Maternini dell'Università di Brescia, Stefano Ricci della Sapienza Università di Roma e Paolo Ritossa dell'Università di Cagliari, mentre il direttore è stato indicato nella persona di Giovanni Corona.

La prima presentazione della collana, come riportato nell'Introduzione al primo volume, riportava un elenco di sette volumi programmati, volutamente suddivisi secondo i differenti settori di trasporto, con i nominativi dei curatori. Le numerose discussioni sul contenuto di quanto già programmato e la constatazione di aver dovuto trascurare argomenti anche importanti per i molteplici settori dei trasporti trattati nei diversi volumi, hanno suggerito, anche attraverso i successivi contatti con altri esperti, di estendere i titoli della collana ad altre tematiche per arricchire il campo delle conoscenze.

Da tutto questo è maturata l'idea di aggiungere alla collana altre quattro tematiche, alle quali corrisponderanno altrettanti volumi, come verrà illustrato di seguito nell'Introduzione del comitato scientifico. Il programma della collana, già all'origine molto ambizioso, diventa in tal modo veramente imponente, ma siamo certi che, con il contributo di tanti colleghi, riusciremo sicuramente nell'impresa.

Come promotore e direttore non posso che ringraziare tutti coloro sono impegnati in questa impresa, in modo particolare i più i giovani, che stanno lavorando intensamente, per una finalità certamente molto meritoria da un punto di vista conoscitivo in quanto risulta in perfetta sintonia con le evoluzioni del fenomeno nel tempo e quindi con le conseguenti trasformazioni della nostra disciplina.

Giovanni Corona





PREMESSA DEL CURATORE DEL VOLUME

L'obiettivo del volume "Trasporti e città - Mobilità e pianificazione urbana" è quello di avviare una sintesi tra due discipline (Trasporti e Urbanistica) fondamentali per l'analisi e la gestione delle città e del territorio, analizzando le profonde interazioni tra la pianificazione urbanistica/territoriale e l'offerta di trasporto.

Tale lavoro di sintesi, richiesto da diversi ambiti della società civile, è di notevole attualità ed interesse, anche per le recenti innovative leggi urbanistiche vigenti, diverse in ogni regione.

Gli argomenti trasportistici sono qui declinati nell'analisi del territorio e soprattutto della città nell'ambito del tema della "mobilità", qui intesa come elemento in cui si possano fondere le tecniche delle due discipline sopra citate.

È noto che l'evolversi dei trasporti di cose e persone ha sempre accompagnato la storia dell'umanità, con uno stravolgimento agli inizi dell'ottocento quando si è riusciti ad avere mezzi di trasporto terrestri con trazione meccanica e quindi lo sviluppo del trasporto ferroviario ha inciso in modo rilevantissimo nella pianificazione degli insediamenti di persone e delle attività produttive. Nel novecento la nascita del trasporto individuale meccanizzato, che si è sviluppato dopo la seconda guerra mondiale e che ha portato l'Italia ad essere il paese che presenta il maggior numero di autovetture per abitante, ha reso necessario individuare tecniche per la gestione della mobilità, che dagli ultimi anni del secolo scorso sono state riviste (soprattutto nei paesi del nord Europa) avviando un ripensamento su come si potesse trattare adeguatamente il tema della mobilità nei gruppi disciplinari di trasporti e di urbanistica, soprattutto per l'ambiente urbano.

Si è quindi dimostrato che nelle città non era più possibile soddisfare la domanda di trasporto analizzandola solo quantitativamente e non ci si poteva permettere di trascurare l'analisi delle modalità di accesso ai servizi, di cui se ne pianificavano la localizzazione, accettando lo spostamento con la sola autovettura privata. Inoltre, negli ultimi cinquant'anni, la pianificazione urbanistica, generalmente, ha consumato un'enorme quantità di suolo a favore dell'edificato e non è riuscita a contenere il fenomeno di un'edificazione rada, quindi a bassa densità (*sprawl*), con i conseguenti noti rilevanti problemi per la gestione degli spostamenti.

Pertanto, nella città contemporanea, la mobilità non può essere affrontata dividendo le tematiche trasportistiche da quelle urbanistiche, ma si dovrebbe giungere ad un approccio culturale di sintesi che permetta ai tecnici di trattarla congiuntamente, e non in momenti o con modalità diverse.

Tale nuovo approccio culturale individuerrebbe alcuni primi elementi di una "nuova" Tecnica della mobilità urbana.

Il presente volume è diviso in tre capitoli, il primo affronta l'offerta di trasporto, il secondo le interazioni tra i sistemi di trasporto e la città e il terzo il tema della sostenibilità nella pianificazione dei trasporti.

Nel primo capitolo, dopo aver analizzato la possibile integrazione tra la pianificazione urbanistica e quella della mobilità, si approfondiscono alcuni aspetti dell'ingegneria del traffico, determinando i livelli di servizio veicolare e degli utenti non motorizzati nelle aree urbane e fornendo elementi sufficienti per interpretare le reti di trasporto in funzione dell'assetto del territorio. Inoltre, si introduce la tematica della vulnerabilità delle reti stradali e si dà una panoramica sui sistemi di raccolta dei diversi dati di traffico. In tale capitolo si propone una classificazione dei sistemi di trasporto e delle infrastrutture stradali, teorizzando le indagini necessarie alla pianificazione urbanistica e del territorio, e si forniscono i principali elementi per sistematizzare il ruolo dei diversi sistemi di TPL nella struttura di una città.





PREMESSA DEL CURATORE DEL VOLUME

Il secondo capitolo approfondisce le numerose interazioni dei sistemi di trasporto con la città. Dopo una prima classificazione delle esternalità, fornendo indicazioni per la monetizzazione di tali fenomeni, si approfondisce la tematica dell'accessibilità in funzione della localizzazione delle attività e delle diverse tipologie di aree urbane. Si definiscono anche le plusvalenze delle aree generate dalla presenza di sistemi di trasporto, dando indicazioni sulle procedure che le pubbliche amministrazioni potrebbero adottare per le acquisizioni delle aree e per dotarsi delle risorse necessarie per la realizzazione delle opere. Tra le esternalità si descrive anche il rilevante fenomeno dell'incidentalità stradale, indicando metodologie per l'elaborazione dei relativi dati.

Il tema della mobilità sostenibile è vastissimo e generalmente si abusa del termine "sostenibile", cui non corrisponde un significato univoco. Quindi, nel terzo capitolo si indicano i limiti della pianificazione tradizionale per poter individuare modelli di pianificazione per una mobilità con tali caratteristiche, fornendo indicazioni per la loro redazione e integrando tra loro input trasportistici, urbanistici e territoriali. Pertanto si descrive anche l'approccio noto come TOD - *Transit Oriented Development*, che risulta una delle prime sperimentazioni di pianificazione ambivalente, per integrare la progettazione urbanistica con quella dei trasporti, selezionando anche alcuni indicatori che caratterizzano la sostenibilità delle politiche di mobilità.

Il volume è il frutto del contributo di 32 autori di 10 sedi universitarie per tendere all'obiettivo di descrivere lo stato dell'arte della ricerca consolidata sul tema della mobilità in relazione alla città e al territorio.

Giulio Maternini



A5 ELEMENTI DI INGEGNERIA DEL TRAFFICO

- A5.1 IL SISTEMA STRADALE URBANO E LA CAPACITÀ
- A5.2 CAPACITÀ FISICA E CAPACITÀ AMBIENTALE
- A5.3 CAPACITÀ DELLA RETE
- A5.4 REGOLAZIONE DELLE INTERSEZIONI
- A5.5 EFFETTI DELLA MODERAZIONE DEL TRAFFICO SULLA CAPACITÀ DELLE STRADE
- A5.6 REGOLAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE
- A5.7 ALCUNI ELEMENTI RIGUARDANTI I MODELLI DI SIMULAZIONE DEL TRAFFICO

A5.1 IL SISTEMA STRADALE URBANO E LA CAPACITÀ

Si indica come *sistema stradale urbano* l'insieme domanda-offerta di trasporto realizzato dalle varie componenti della mobilità che utilizzano la rete stradale urbana. La complessità del sistema scaturisce dalla eterogeneità delle componenti della domanda che si trovano a condividere lo spazio stradale, ciascuna contraddistinta da specifiche prestazioni ed esigenze di viaggio. Alla strada è richiesto di garantire, oltre alla funzione di collegamento fra zone diverse della città, tipica dell'infrastruttura viaria, anche quella di accesso agli isolati e, soprattutto nelle aree centrali, di costituire un luogo di relazione fra le persone per finalità non solo commerciali ma anche di incontro e svago. Tali funzioni si integrano fra loro con difficoltà perché necessitano ciascuna di spazi stradali idonei, appositamente attrezzati. Infatti la funzione di collegamento richiede di destinare uno spazio assolutamente prevalente al moto dei veicoli, privilegiando quelli motorizzati, per offrire loro la massima capacità e velocità, mentre la funzione di accessibilità, che si realizza con velocità ridotte, deve garantire spazi per la sosta e condizioni di sicurezza per pedoni e biciclette, infine la funzione di relazione si realizza mettendo a disposizione delle persone ampi spazi per camminare a piedi e stare fermi in condizioni di massima sicurezza per poter fruire di servizi commerciali, di intrattenimento, ecc. La destinazione degli spazi per le diverse funzioni è resa particolarmente delicata dalla forte concentrazione della domanda in aree ed intervalli orari generalmente ristretti che rendono l'offerta molto spesso insufficiente dando luogo ad estesi fenomeni di congestione e di incidenta- lità e, di conseguenza, al degrado delle condizioni ambientali.

Dunque il problema delle funzioni richieste alla strada urbana si lega strettamente al problema della capacità: per garantire la funzione di relazione è necessario dare spazio alla pedonalità a discapito della componente di domanda motorizzata ma ciò riduce la capacità a disposizione di quest'ultima con conseguente rischio di aumentare la congestione peggiorando le condizioni ambientali e di vivibilità e quindi limitando la funzione di relazione; allo stesso modo un potenziamento della funzione di accessibilità, attuato attraverso un aumento dello spazio destinato alla sosta sottratto ai veicoli in marcia con conseguente riduzione della capacità stradale, può condurre ad un aumento della congestione e dei tempi di viaggio e quindi ad un peggioramento anche della stessa funzione di accessibilità che si intendeva potenziare.

Quanto detto giustifica un'attenzione particolare al tema della capacità stradale che viene trattato nel presente capitolo limitatamente ad alcuni importanti aspetti,



talvolta patrimonio della pratica della *Tecnica del traffico e della circolazione*, ma mai trattati in modo sistematico nella letteratura del settore.

A5.2 CAPACITÀ FISICA E CAPACITÀ AMBIENTALE

Come è noto, il termine capacità riferito ad un sistema di trasporto indica il massimo numero di persone o veicoli o unità di carico che possono essere trasportate in un prefissato intervallo di tempo, di solito l'ora, e quindi rappresenta la produttività massima del sistema. In particolare, per una infrastruttura stradale, la capacità, misurata in [veicoli/ora], rappresenta il numero massimo di veicoli che può transitare in una sezione o in un tratto omogeneo di una corsia durante l'ora, in condizioni prevalenti di strada, traffico e regolazione e in assenza di interferenze o condizionamenti derivanti dal funzionamento delle sezioni o dei tratti successivi, quali rallentamenti o accodamenti (TRB - HCM, 2000).

Le condizioni prevalenti di strada, traffico e regolazione sono determinanti nella misura della capacità; ogni loro cambiamento fa variare la capacità della strada: tratti con differenti condizioni prevalenti hanno diversa capacità. Pertanto queste condizioni dovrebbero essere uniformi in ogni tratto dell'infrastruttura a cui la capacità viene riferita. La capacità non è il massimo flusso in assoluto che può essere osservato su una data strada ma il flusso che può essere raggiunto ripetutamente e mantenuto per un intervallo di tempo sufficientemente ampio, sulla stessa strada o su strade con caratteristiche simili. Flussi maggiori della capacità possono essere raggiunti, a pari condizioni di strada, traffico e regolazione, per periodi di tempo molto ridotti ed in situazioni specifiche non facilmente ripetibili e quindi non rappresentative delle effettive possibilità produttive della strada. Come conseguenza di quanto detto, le condizioni prevalenti di strada, traffico e regolazione relative alla viabilità urbana comprendono necessariamente le interferenze causate dalle varie componenti del traffico e dalle intersezioni che si riscontrano frequentemente in città.

Se le caratteristiche dell'infrastruttura, del traffico e della regolazione restano invariate per tutto lo sviluppo, la capacità si mantiene costante in qualsiasi sezione della strada, tranne che nella sezione terminale in corrispondenza dell'intersezione. Nelle intersezioni infatti, dovendosi alternare nello stesso spazio di manovra le correnti veicolari provenienti da più rami di accesso, il tempo di via libera viene suddiviso fra queste ultime che pertanto potranno defluire solo in modo discontinuo realizzando flussi massimi orari di gran lunga inferiori a quelli caratteristici delle sezioni della strada lontane dai nodi. In sostanza, avvalendosi dell'analogia idrodinamica, è possibile paragonare l'arco della rete stradale considerato ad un tubo nel quale scorre acqua in pressione e che presenta all'estremità, cioè in corrispondenza dell'intersezione a valle, una saracinesca che viene aperta e chiusa alternativamente realizzando le condizioni di deflusso e di attesa che si riscontrano in un accesso ad un nodo stradale. Pertanto, indipendentemente dal tipo di regolazione attuata nel nodo, il flusso massimo realizzabile in ciascun accesso passa alternativamente, dal valore della capacità che può raggiungersi negli istanti di via libera, a zero negli istanti di via impedita.

Quindi, nella sezione di accesso all'intersezione, è possibile definire due diversi valori della capacità: il primo riferito ai soli intervalli di tempo in cui è consentito l'accesso cioè, riprendendo l'analogia idrodinamica precedentemente proposta, gli istanti in cui la saracinesca è aperta, ed un secondo riferito all'intera ora e rappresentativo di una media dei valori del flusso massimo realizzabile, calcolato tenendo conto dei tempi di via libera e via impedita che complessivamente si realizzano nell'o-





ra. Il primo valore della capacità, definito "flusso di saturazione" H_{Sat} , rappresenta solo un valore istantaneo in quanto realizzabile solo nel tempo di via libera ed è funzione soltanto delle caratteristiche dell'accesso e dell'area di manovra del nodo; il secondo valore definito rappresenta l'effettiva prestazione dell'accesso in quanto misura il flusso massimo C_A che effettivamente l'accesso è in grado di far transitare in un'ora. Quest'ultimo è funzione del prodotto del flusso di saturazione per l'incidenza, sull'ora, del tempo di via libera di cui l'accesso può usufruire (T_L/T) ed è quindi indirettamente funzione anche dei tempi di via libera ottenuti dagli altri accessi della stessa intersezione e quindi dei flussi che li impegnano. Pertanto:

$$C_A = H_{Sat} \cdot \frac{T_L}{T} \quad [1]$$

È da precisare che il flusso di saturazione H_{Sat} , è presumibilmente diverso dalla capacità rilevabile lungo le sezioni stradali lontane dalle intersezioni in quanto diverse sono, lungo la strada rispetto al nodo, le condizioni di deflusso caratterizzandosi quest'ultimo, rispetto alle altre sezioni, per velocità di marcia più basse e distanziamenti ridotti fra i veicoli. In sintesi è possibile affermare con certezza che la sezione terminale della strada presenta una capacità nettamente inferiore alle altre sezioni.

Pertanto, mentre nella rete stradale extraurbana caratterizzata da intersezioni notevolmente distanziate e sostanziale assenza di interferenze esterne al flusso veicolare la capacità lungo la strada è effettivamente rappresentativa di una prestazione della strada stessa, nella rete urbana la capacità rilevata lungo una sezione stradale diversa da quella di accesso all'intersezione non è rappresentativa del volume di traffico orario che la strada può smaltire perché quest'ultimo è governato dalla capacità dell'accesso a valle. Detta capacità quindi, non dipende soltanto dalle caratteristiche dell'accesso stesso ma anche dai flussi cioè dalla domanda che interessa gli altri accessi alla stessa intersezione. In altri termini, nelle strade urbane la capacità fisica è definita con riferimento ai fenomeni di coda che nascono in corrispondenza delle intersezioni ed è quindi uguale al valore del flusso oltre il quale viene superato un certo livello di probabilità che la coda formatasi all'intersezione a valle superi una determinata lunghezza.

In termini deterministici, la capacità di un accesso C_A e quindi della strada a monte rappresenta il valore entro cui il flusso di domanda H_A può crescere senza che il rapporto H_A/C_A superi l'unità e cioè senza che il sistema passi in condizioni di saturazione caratterizzate dal continuo allungamento della coda.

Per spiegare il fenomeno della coda di veicoli presenti agli accessi alle intersezioni in condizioni di sottosaturazione è necessario tener conto della casualità degli arrivi dei veicoli. Per contro, l'ipotesi di cadenzamento costante negli arrivi, cioè di distanziamento reciproco costante fra i veicoli che si succedono in una sezione, significa assumere che, per esempio, in presenza di un flusso orario di 600 veic./h equivalente appunto al passaggio di 600 veicoli durante l'intera ora di rilevamento, si registrino 10 veicoli ogni minuto ed esattamente un veicolo ogni 6 secondi, cosa che in realtà può accadere, dal momento che la legge degli arrivi è di tipo aleatorio, solo al raggiungimento della capacità della strada allorché i veicoli sono tutti accodati a distanza minima. L'ipotesi di cadenzamento costante applicata anche al funzionamento dell'intersezione implica che tutti i veicoli della corrente considerata effettuino l'attraversamento del nodo impiegando esattamente lo stesso tempo. Assumendo quindi una capacità dell'accesso ancora di 600 veic./h, l'ipotesi di uniformità nel funzionamento si traduce nell'attraversamento dell'intersezione da parte di un veicolo esattamente ogni 6 secondi.





Nell'ipotesi evidentemente non realistica di uniformità degli arrivi e delle partenze all'accesso dell'intersezione, ed avendo assunto pari a 600 veic/h la capacità dell'accesso, non si rileva nessun veicolo in attesa (completa assenza di coda) finché il flusso dei veicoli in arrivo si mantiene entro i 600 veic/h; invece la coda nasce e cresce continuamente quando la domanda supera anche di una sola unità il valore della capacità. Infatti per arrivi uniformi in numero minore o uguale al valore della capacità dell'accesso ogni veicolo attraversa appena arriva; diversamente, la domanda supera la capacità e quindi i veicoli in esubero sono costretti ad accodarsi facendo nascere e crescere la coda.

Nella realtà le ipotesi di uniformità degli arrivi (domanda) e delle partenze dall'accesso (offerta) non si realizzano per via della assoluta casualità del cadenzamento dei veicoli in arrivo e per l'impossibilità di attraversare l'intersezione con un cadenzamento costante che peraltro non consentirebbe il transito ai veicoli provenienti dagli altri accessi. In altri termini, quindi se anche i veicoli arrivassero all'intersezione con cadenzamento costante, almeno alcuni di essi sarebbero comunque costretti a fermarsi per attendere che, nella corrente da attraversare, si manifesti un intervallo di tempo sufficiente a consentire loro la manovra; questo arresto dà luogo ad un accodamento dei veicoli che seguono, alcuni dei quali poi potranno attraversare l'intersezione dietro il primo veicolo della coda, qualora l'intervallo manifestatosi nella corrente da attraversare sia sufficientemente ampio, oppure dovranno attendere a loro volta la manifestarsi di un intervallo adeguato. Pertanto, anche in presenza di un flusso di arrivi inferiore alla capacità dell'accesso all'intersezione, per effetto della irregolarità nella distribuzione dei veicoli in arrivo ed in partenza può crearsi una coda la cui probabilità di esistenza e lunghezza è tanto maggiore quanto più il rapporto domanda - offerta è prossimo all'unità. Per valori di detto rapporto superiori ad 1 la coda non può che crescere. Quanto detto evidenzia la necessità di affrontare in termini probabilistici lo studio dei fenomeni di coda mentre un approccio deterministico è sufficiente per ragionare in base ai valori medi orari dei flussi interessanti una strada e l'accesso all'intersezione a valle.

La capacità fisica non è la sola prestazione importante per una strada, soprattutto in città. La viabilità urbana infatti, a differenza di quella extraurbana, svolge, oltre alle funzioni di collegamento ed accessibilità, anche quella di relazione e quindi costituisce il luogo di molte attività umane, quali passeggiare, incontrarsi, fare acquisti. Il presupposto per lo svolgimento di queste attività è rappresentato da un ambiente favorevole in termini di qualità dell'aria, rumore, sicurezza e paesaggio. Dalla constatazione che la circolazione stradale ha un impatto negativo sulla qualità dell'ambiente delle aree urbane attraversate e che tale impatto si manifesta spesso in presenza di flussi veicolari ben inferiori ai valori della capacità fisica discende il concetto di *capacità ambientale* introdotto da Buchanan (1963).

La capacità ambientale può essere definita come il flusso in corrispondenza del quale si verificano condizioni inaccettabili in una almeno delle componenti dell'ambiente esterno ovvero il flusso al di là del quale le funzioni urbane e la qualità della vita vengono avvertite come sensibilmente degradate. Quindi la capacità ambientale rappresenta una prestazione della strada in quanto misura l'attitudine di quest'ultima a sopportare il traffico senza che ne derivi un sensibile peggioramento dell'ambiente circostante.

La capacità ambientale si lega al concetto di sostenibilità ambientale del traffico veicolare che è rappresentabile attraverso un numero abbastanza grande di parametri, alcuni dei quali fortemente soggettivi, prevalentemente legati alle caratteristiche della strada stessa e dell'ambiente che la circonda. Evidentemente assumere la so-





stenibilità quale criterio in base al quale valutare una determinata azione economica, qual è tipicamente la mobilità, complica non poco le cose, poiché la sostenibilità, a differenza dell'efficienza funzionale, è un obiettivo costituito da molti criteri tra loro in conflitto. Ciò comporta che il miglioramento di uno di essi spesso non è in linea con il miglioramento di un altro. La sostenibilità è quindi un problema decisionale con diverse funzioni obiettivo. La messa a punto di un indicatore in grado di esprimere la capacità ambientale segue la procedura consolidata della costruzione di un indicatore multicriteri che, come è noto, richiede l'individuazione delle componenti da monitorare quindi la definizione delle condizioni limite e l'individuazione del peso da attribuire a ciascuna componente. Naturalmente, per rendere più semplice l'indicatore, è opportuno considerare un limitato numero di aspetti che caratterizzano l'ambiente, quali l'inquinamento atmosferico, il rumore, la sicurezza.

In generale i parametri che influiscono sull'attitudine della strada a sopportare il traffico ricadono all'interno di tre categorie connesse rispettivamente alle caratteristiche di:

- traffico: entità, distribuzione e composizione dei flussi veicolari, velocità massima e variazioni della velocità;
- strada: plano-altimetria, larghezza, presenza di spazi idonei per utenti non motorizzati;
- contesto urbano circostante.

Con riferimento ad una rete stradale costituita da un numero n di tronchi. Una funzione di qualità ambientale dipende, nel caso più generale, dalle seguenti categorie di variabili:

- la distribuzione dei flussi di traffico sui tronchi della rete, rappresentati dal vettore f ;
- le proprietà geometriche e funzionali dei tronchi della rete (numero di corsie, numero di intersezioni, lunghezza dei tronchi stradali tra un nodo ed il successivo, parametri del ciclo semaforico, ecc.), rappresentate dalla matrice π ;
- le caratteristiche dell'ambiente esterno (condizioni meteorologiche e conformazione plano-altimetrica), rappresentate dalla matrice α ;
- i punti dello spazio in cui si vuole valutare la funzione Q di qualità ambientale, rappresentati dal vettore p .

Pertanto, tenendo conto soltanto dell'inquinamento atmosferico, si può definire capacità ambientale C_{amb} di una strada (Distefano e Leonardi, 2005) il minimo valore del flusso veicolare in corrispondenza del quale si ha il raggiungimento di un vincolo ambientale cioè il raggiungimento del limite di attenzione, definito dalle norme ambientali, per una specificata sostanza inquinante.

È quindi possibile stabilire la relazione implicita:

$$C_{Amb} = C_{Amb}(f, \pi, \alpha, p) [2]$$

Il valore di C_{amb} deve essere ricavato utilizzando modelli di previsione delle emissioni e della concentrazione degli inquinanti contenenti le variabili f , π , α e p che permettono, di calcolare quel valore del vettore flussi f oltre il quale si raggiunge il limite per un dato tipo di inquinante.

Il ragionamento può estendersi ad altri aspetti correlati all'ambiente e quindi è possibile costruire, per ciascun aspetto ambientale, la stessa funzione con la differenza che, lì dove non esistono normative da cui trarre valori di riferimento, la valutazione assume una maggiore soggettività.

Un metodo di valutazione che tiene conto complessivamente di tutti gli aspet-



ti connessi con la qualità ambientale senza tuttavia utilizzare riferimenti oggettivi è quello proposto da Buchanan nell'ambito di una procedura di valutazione del miglioramento ambientale conseguente ad un intervento di sistemazione di una strada (Cappelli et al., 2000). Detto metodo definisce la capacità ambientale C_{amb} come il prodotto della capacità fisica per un coefficiente riduttivo ($E/100$) rappresentativo dell'adeguatezza dell'ambiente creato dalla strada e dal traffico e cioè:

$$C_{Amb} = C \cdot \left(\frac{E}{100} \right) [3]$$

Il coefficiente E è stimato sulla base di un punteggio calcolato come somma di punteggi parziali relativi ad aspetti specifici. Detti punteggi presentano un intervallo di valori definito che limita, ma non elimina, l'arbitrarietà dell'operatore e che indirettamente attribuisce un diverso peso a ciascun aspetto nella stima del coefficiente riduttivo. Per richiamare gli aspetti considerati nella metodologia si riporta la tabella 1 tratta dalla fonte già citata a cui si rimanda per approfondimenti. Si evince che l'attribuzione del punteggio massimo per tutti gli aspetti considerati fa raggiungere ad E il valore 100 che, per la [3], comporta $C_{amb} = C$ e quindi una capacità ambientale uguale a quella fisica.

Caratteristica	Aspetto considerato	Punti max
Sicurezza	Separazione totale fra veicoli e pedoni	23
	Assenza di strade primarie o di scorrimento o di altro traffico inadatto	13
	Nessun importante punto di conflitto né velocità eccessive	13
Comfort	Nessuna zona pedonale o abitazione vicino al traffico medio-pesante	6
	Come sopra in rapporto a parcheggi, garage, sovrappassi	4
	Nessun effetto scala	2
Utilità	Nessuna separazione tra utilizzazioni strettamente unite per causa di via di traffico o di altri traffici inadatti	4
	Funzionalità del sistema di accesso pedonale all'interno della zona o verso altre zone	4
	Comodità di accesso ai trasporti pubblici da parte dei pedoni	4
Aspetto	Nessuna prevalenza sull'ambiente da parte dei veicoli in movimento o in sosta	3
	Idem da parte di strutture per veicoli: autorimesse, sovrappassi, sopraelevate, ecc.	3
	Idem da parte di distributori di carburante, dispositivi di guida e gestione del traffico	21
Massimo punteggio complessivo		100

Tabella 7

Punteggi massimi da attribuire ai vari aspetti ambientali per la determinazione del coefficiente E

A5.3 CAPACITÀ DELLA RETE

La valutazione della rispondenza complessiva di una rete stradale ad un determinato volume di traffico è particolarmente utile per verificare gli effetti di una classificazione delle strade, operazione richiesta nella redazione dei Piani urbani del traffico. Infatti, per effetto della classificazione delle strade, la rete viene ad essere suddivisa in più sub-reti sovrapposte ed interconnesse (di solito strade locali, strade di quartiere, strade di scorrimento ed autostrade urbane) che devono essere impegnate da spostamenti di lunghezza via via maggiore.



D'altra parte è noto che la classificazione di una infrastruttura stradale all'interno di un determinato livello funzionale è un'operazione non automatica in quanto basata su molteplici parametri, non tutti quantificabili. In particolare, dovendo la classificazione tener conto del ruolo che la strada svolge attualmente e di quello che potrebbe svolgere nell'ambito della riorganizzazione complessiva della rete, è necessario guardare, sia alla vocazione dell'infrastruttura conseguente alle caratteristiche proprie, dell'edificato circostante e dell'area urbana in cui è inserita, sia alle alternative di percorso offerte dalla rete. Ne consegue perciò che la stessa strada può spesso trovare una corretta collocazione in più livelli funzionali alternativi sulla base di valori ed importanza attribuiti dal pianificatore ad aspetti non facilmente ed univocamente determinabili. E tuttavia la classificazione attribuita non è ininfluente circa la adeguatezza, della stessa strada e della rete a cui essa appartiene, a servire spostamenti di una data lunghezza.

Sulla base delle considerazioni esposte emerge la necessità di una verifica della possibilità delle diverse sub reti di servire gli spostamenti che ad esse derivano per effetto della classificazione. A tal fine è opportuno associare una capacità, cioè un'offerta, non ad una sezione stradale, ma ad una intera rete moltiplicando il valore medio della capacità caratterizzante una sezione di una corsia rappresentativa delle strade appartenenti ad una rete omogenea per lo sviluppo delle corsie di quest'ultima, ottenendo una capacità di rete C_r che risulta proporzionale alla capacità delle sezioni C_m e allo sviluppo delle corsie appartenenti alla rete S , cioè:

$$C_r = C_m \cdot S \quad [4]$$

Con S in km, C_m in veic./h, C_r in veic. x km / h.

Con riferimento ad una rete stradale urbana suddivisa in autostrade, strade di scorrimento, strade di quartiere e strade locali, le cui corsie presentano ciascuna, per effetto della classificazione effettuata, una capacità media puntuale pari rispettivamente a C_A , C_S , C_Q e C_L ed uno sviluppo complessivo S_A , S_S , S_Q e S_L , la capacità complessiva della rete gerarchizzata espressa in veic.x km/h, è data da:

$$C_{rete} = C_A \cdot S_A + C_S \cdot S_S + C_Q \cdot S_Q + C_L \cdot S_L \quad [5]$$

Parallelamente è necessario quantificare gli spostamenti, cioè la domanda, in funzione della loro lunghezza e quindi definire il volume di traffico H_r come prodotto del numero di spostamenti richiesti nell'unità di tempo H_m per la lunghezza L :

$$H_r = H_m \cdot L \quad [6]$$

Con L in km, H_m in veic./h, H_r in veic. x km / h.

Per quanto attiene la domanda che impegna le diverse sub-reti, è possibile distinguere idealmente, in ciascuno spostamento, tre parti, due di estremità ed una centrale; le due estremità rappresentano la parte di accessibilità cioè quella necessaria per accedere all'origine e alla destinazione mentre la parte centrale quella di collegamento. Quest'ultima, che è assente o trascurabile negli spostamenti di lunghezza minima, assume una dimensione percentualmente sempre più rilevante quanto maggiore è la lunghezza complessiva dello spostamento, spingendo all'utilizzo di strade di livello via via maggiore che possono offrire prestazioni migliori e perciò permettere di contenere i tempi di viaggio. Pertanto è evidente che gli spostamenti più brevi impegnano solo le strade di livello inferiore (per esempio quelle di





locali) essendo in essi esclusiva o assolutamente prevalente la parte di accessibilità, mentre quelli di lunghezza via via maggiore, pur impegnando le strade di livello inferiore per realizzare la parte iniziale e finale, sviluppano lungo le strade di livello via via maggiore la parte centrale dello spostamento che presenta un peso relativo crescente all'aumentare della lunghezza del viaggio fra origine e destinazione. È possibile altresì affermare che, in linea di principio, tutti gli spostamenti, qualunque sia la loro lunghezza, impegnano le strade di livello inferiore (locali), mentre le strade classificate nei livelli superiori sono percorse solo da quegli spostamenti la cui lunghezza supera un determinato valore di soglia che rende vantaggioso trasferirsi su infrastrutture più veloci. Pertanto il carico che grava sulle strade classificate al livello più basso è rappresentato da tutti gli spostamenti con origine e destinazione in tali strade, mentre quello che va ad impegnare le strade di livello superiore deve avere una lunghezza maggiore di un valore soglia.

Quanto detto è di supporto ad una corretta valutazione dell'impegno di ciascuna sub-rete risultante dalla classificazione delle strade. In una rete gerarchizzata, indicando con H_A , H_S , H_Q e H_L la domanda oraria media su una sezione rappresentativa di ciascuna sub rete, rispettivamente di autostrade, strade di scorrimento, di quartiere e locali e con L_A , L_S , L_Q ed L_L la lunghezza media che ciascun tipo di spostamento deve avere per utilizzare rispettivamente la rete di autostrade, strade di scorrimento e strade di quartiere oltre a tutte le reti di livello inferiore, è possibile quantificare la domanda complessiva in [veic.xkm/h], attraverso l'espressione:

$$H_{rete} = H_A \cdot L_A + H_S \cdot L_S + H_Q \cdot L_Q + H_L \cdot L_L \quad [7]$$

Dove:

H_L = flusso medio su una corsia delle strade locali somma di tutti gli spostamenti di qualsiasi lunghezza che, per quanto detto precedentemente, impegnano anche le strade locali,

H_Q = flusso medio su una corsia di una strada di quartiere somma degli spostamenti che hanno lunghezza tale da utilizzare sia le strade di quartiere, sia quelle di scorrimento, sia le autostrade urbane,

H_S = flusso medio su una corsia di una strada di scorrimento somma degli spostamenti che hanno lunghezza tale da utilizzare sia le strade di scorrimento, che le autostrade urbane,

H_A = flusso medio su una corsia della rete autostradale urbana.

La [7] rappresenta l'area, approssimata a rettangoli, sottesa dal diagramma di figura 13 negli intervalli di lunghezza definiti dai valori medi L_L , L_Q , L_S ed L_A .

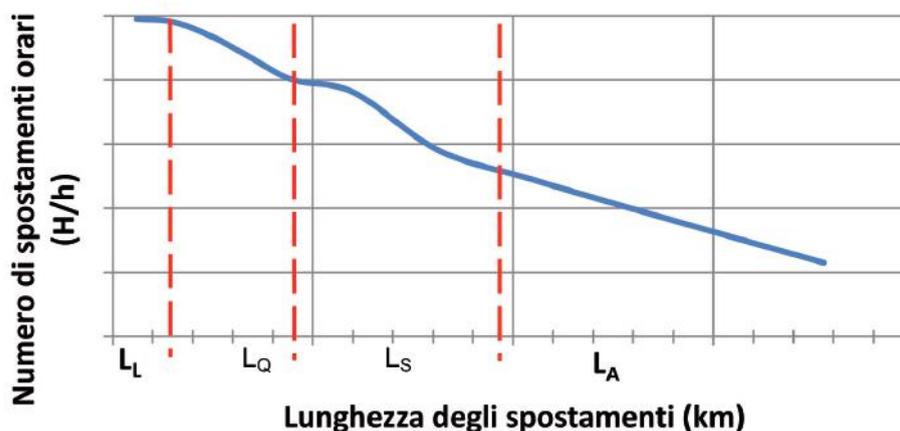


Figura 13

Volume di traffico che impegna le diverse categorie di strade classificate

È possibile quindi porre a confronto H_{rete} con C_{rete} ed ottenere una misura del rapporto flusso/capacità (ovvero domanda/offerta) e quindi della qualità del funzionamento della rete. In particolare il raffronto fra H_{rete} e C_{rete} , con riferimento ad una determinata classificazione delle strade da cui emergono i valori di C_A , C_S , C_Q e C_L nonché S_A , S_S , S_Q e S_L , fornisce una valutazione della rispondenza della classificazione effettuata rispetto alla domanda da servire.

Affinché la domanda possa essere calcolata e quindi utilizzata per la verifica della classificazione delle strade di una rete urbana, è necessario stabilire la lunghezza minima degli spostamenti che ciascuna sub-rete di livello superiore a quello minimo deve servire. La scelta di tali valori è funzione della dimensione dell'area urbana e dello sviluppo delle reti di livello superiore. La maggiore estensione dell'area urbana aumenta la lunghezza degli spostamenti ed il numero di quelli più lunghi mentre caratteristiche migliori delle sub-reti di livello più elevato, quali lo sviluppo, l'articolazione e l'interconnessione, sono in grado di attrarre un maggior numero di spostamenti e quindi di alleggerire la domanda sulle sub-reti di livello inferiore. Pertanto i valori di soglia per le lunghezze degli spostamenti da caricare sulle sub-reti di livello superiore saranno tanto minori quanto più estese e con migliori caratteristiche si presentano queste ultime.

Se la capacità di rete calcolata in tal modo risulta essere deficitaria per un livello della gerarchia ed in eccesso per un altro, il bilanciamento di capacità può essere raggiunto alterando i valori di soglia della distanza oppure variando la classificazione attribuita ad alcune strade. Un aggiustamento del primo tipo rappresenta una sorta di calibrazione del modello così costruito e richiede grande attenzione dal momento che l'innalzamento o l'abbassamento di un valore di soglia sposta un certo volume di traffico verso una sub-rete di livello rispettivamente inferiore o superiore. Quando si sono individuati valori soglia accettabili per le distanze è possibile invece uniformare il rapporto H/C fra le diverse sub-reti variando in modo opportuno la classificazione attribuita ad alcune strade per raggiungere l'assetto ottimale per ciascuna sub-rete.

Per l'individuazione dei valori di soglia delle distanze può risultare molto utile rilevare il comportamento degli utenti (valutabile con interviste su un campione molto



ristretto) attraverso il quale è possibile stimare la lunghezza media che lo spostamento deve avere per spingere il guidatore a spostarsi dalle strade locali a quelle di quartiere, da queste a quelle di scorrimento e da quelle di scorrimento alle autostrade urbane. Naturalmente l'aumento delle velocità commerciali e/o l'allungamento dei percorsi su alcuni itinerari conseguenti all'attuazione di provvedimenti di regolazione della circolazione nonché l'eventuale riduzione della velocità commerciale causata da programmi di moderazione del traffico attuati su alcune strade possono modificare i valori delle lunghezze degli spostamenti da associare a ciascuna sub-rete classificata.

È chiaro che la stima delle lunghezze in questione presenta ampi margini di soggettività ed è quindi affidata alla sensibilità dell'operatore, ma le grandezze da individuare non possono ragionevolmente variare in intervalli molto ampi e pertanto la verifica proposta non perde di significatività pur rappresentando uno strumento di supporto orientativo per una corretta classificazione delle strade.

A5.4 REGOLAZIONE DELLE INTERSEZIONI

Alcune riflessioni di seguito sviluppate possono risultare molto utili alla comprensione dei meccanismi e dei parametri che influiscono sulla capacità delle intersezioni stradali ed essere di aiuto al progetto di regolazione.

Un rapido metodo di verifica preliminare delle intersezioni, indipendente dal tipo di regolazione adottata, scaturisce dal concetto stesso di intersezione come il luogo fisico di più punti di conflitto che nascono dall'intersecarsi delle traiettorie di due o più correnti veicolari. Detto luogo, comunemente definito *area di manovra*, presenta una capacità che dipende innanzitutto dal numero di corsie che in esso si realizzano, vale a dire dal numero di file di veicoli che possono transitare contemporaneamente impegnando traiettorie parallele o comunque fra loro indipendenti.

La figura 14 evidenzia, in una generica intersezione a 4 rami, l'area di manovra schematizzata fra gli spigoli 1, 2, 3, 4 nella quale è possibile il transito di una sola manovra alla volta, se si esclude la possibilità di realizzare canalizzazioni in corrispondenza degli accessi (per la ridotta dimensione di questi ultimi) che rende molto difficile il transito contemporaneo anche delle manovre non in conflitto tra loro.

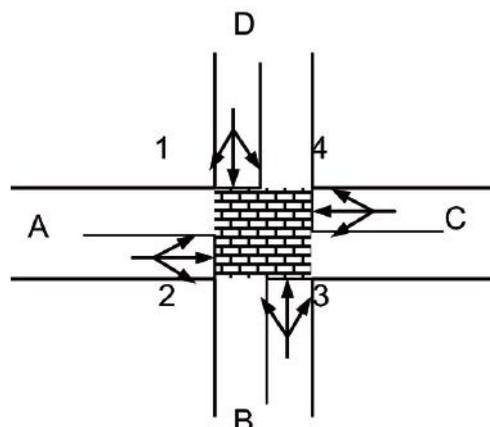


Figura 14

Manovre ed area di incrocio in una intersezione tipo a quattro bracci



In ogni corsia stradale la capacità H offerta è direttamente proporzionale alla velocità di marcia v e alla densità veicolare che su di essa si realizza δ , secondo la nota legge del deflusso

$$H = v \cdot \delta(v) \quad [8]$$

Naturalmente il flusso massimo H_m che può realizzarsi nell'unica corsia individuabile nell'area di manovra si distribuirà fra le diverse manovre possibili provenienti da ciascun accesso in modo differente a seconda del tipo di regolazione. È possibile quindi affermare che, qualunque sia la regolazione scelta, la somma dei flussi di tutte le manovre che confluiscono nel nodo non può superare il valore H_m proprio dell'area di manovra che è funzione dei parametri v e δ caratteristici del deflusso che si realizza nell'area stessa. In altri termini, ponendo i flussi in forma matriciale (tabella 8), sempre nell'ipotesi che l'area di incrocio permetta il transito di una sola manovra per volta, la somma di tutti i flussi entranti nel nodo (indicati con il pedice "e"), rappresentati dalla somma per righe della matrice in questione, non deve superare il flusso massimo H_m che può impegnare l'area in questione.

	A	B	C	D	tot
A	0	H_{AB}	H_{AC}	H_{AD}	H_{Ae}
B	H_{BA}	0	H_{BC}	H_{BD}	H_{Be}
C	H_{CA}	H_{CB}	0	H_{CD}	H_{Ce}
D	H_{DA}	H_{DB}	H_{DC}	0	H_{De}
tot	H_{Au}	H_{Bu}	H_{Cu}	H_{Du}	

Tabella 8

Schematizzazione matriciale dei flussi di manovra in una intersezione a quattro bracci

In sintesi dovrà verificarsi che:

$$(H_{Ae} + H_{Be} + H_{Ce} + H_{De} +) < H_m \quad [9]$$

e generalizzando

$$\sum_{i=1}^n (H_{ie}) < H_m \quad [10]$$

essendo n il numero dei rami di accesso all'intersezione.

Evidentemente se, come spesso accade, esistono manovre che non presentano fra loro punti di conflitto ed il cui deflusso può quindi avvenire contemporaneamente grazie anche ad idonee canalizzazioni, la [10] è ancora valida a condizione che, nella sommatoria, si considerino i flussi di ciascuna manovra anziché di ciascun accesso e, per ogni gruppo di manovre che avvengono contemporaneamente, si tenga conto solo del flusso relativo a quella più carica.

La verifica proposta è la prima da fare per poter valutare il funzionamento dell'intersezione nella configurazione in cui si trova. Infatti il soddisfacimento della disequazione [10] assicura che qualunque sia la ripartizione dei tempi di via libera fra le manovre (spontanea o preordinata) e conseguentemente la ripartizione della capacità fra le stesse, ferma restando la configurazione dell'intersezione, la capacità dell'area di manovra non sia inferiore a quella richiesta complessivamente dai flussi delle manovre interessate. Se questa verifica non è soddisfatta non esiste re-



golazione che, conservando la configurazione data, possa evitare un funzionamento in condizioni diverse dalla saturazione che in questi casi si riscontra. Infatti neanche la regolazione semaforica può sopperire ad una capacità largamente insufficiente dell'area di manovra sebbene, come è noto, la stessa sia in grado di migliorare l'efficienza dell'intersezione raccogliendo i veicoli in plotoni durante le fasi di rosso per poi farli transitare con il distanziamento reciproco minimo, e quindi nel minor tempo possibile, nelle fasi di verde. Una conferma di ciò può ottenersi analizzando la nota formula per il calcolo del ciclo minimo di una regolazione semaforica (CNR, 1992) costruita, come è noto, sotto l'ipotesi di cadenzamento costante degli arrivi:

$$C = \frac{P}{(1-\gamma)} \quad [11]$$

Con la seguente simbologia:

$P = V_{SP} + \sum_i (5 + TR_i) =$ perditempo,

$TR_i =$ tempo di tutto rosso,

$V_{SP} =$ verde solo pedonale (eventuale),

$Y = \sum_i y_i$ con $y_i = H_i / H_{Sat} =$ indice di carico di ciascuna fase,

$H_i =$ flusso di calcolo relativo a ciascuna fase (secondo quanto specificato più avanti nel paragrafo),

$H_{Sat} =$ flusso di saturazione cioè il massimo flusso con cui i veicoli di ciascuna manovra attraversano l'intersezione, ossia H_m .

Esplicitando Y nella [11] si ottiene una espressione del ciclo in funzione dei flussi H_i

$$C = \frac{P}{\left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{H_{Sat}}\right]} \quad [12]$$

È evidente che la [12] assume valori negativi e perde quindi di significato qualora non risulti

$$\sum H_i < H_{Sat} \quad [13]$$

e cioè quando la somma dei flussi in arrivo da tutti gli accessi in tutte le fasi raggiunge o supera la capacità di ciascun accesso rappresentativa della capacità dell'area di manovra. In questo caso l'unica possibilità di ottenere una regolazione efficace risiede nel potenziamento della capacità dell'area di manovra realizzabile attraverso l'impegno di spazi più ampi opportunamente organizzati con canalizzazioni.

L'aspetto considerato non deve tuttavia far dimenticare che, qualora sia soddisfatta la [13], è possibile ottenere incrementi di capacità di una intersezione semaforizzata riducendo il numeratore della [12] rappresentativo dei perditempo della regolazione cioè dei tempi accessori non utilizzati dai veicoli. Infatti, a parità di altre condizioni, la riduzione del perditempo presente al numeratore, comporta un efficientamento della regolazione che si traduce nella diminuzione della lunghezza del ciclo semaforico ovvero nella possibilità di far transitare flussi più elevati con lo stesso ciclo. È tuttavia da far presente che la riduzione del perditempo può ottenersi prevalentemente abbassando il numero di fasi della regolazione, cosa che, in linea di principio, comporta un aumento dei punti di conflitto fra le manovre defluenti contemporaneamente, con peggioramento delle condizioni di sicurezza.





Dunque se la relazione [10] ovvero la [13] non risultano soddisfatte, la regolazione da progettare richiede un aumento della capacità dell'area di manovra oppure una riduzione dei flussi che interessano complessivamente le manovre consentite. È da notare che la riduzione delle manovre consentite ottenuta mediante l'imposizione di divieti di manovra oppure di sensi unici di marcia su alcuni rami, può rappresentare una valida soluzione, non solo perché riduce i punti di conflitto e di conseguenza i perditempo connessi con il trasferimento del via libera da una manovra all'altra, ma anche perché comporta generalmente una riduzione dei flussi complessivamente interessanti l'intersezione come conseguenza della diversione di alcuni veicoli dall'itinerario prima del raggiungimento del nodo in questione. La sola riduzione dei punti di conflitto senza riduzione dei flussi in transito, ancorché benefica per il funzionamento dell'intersezione in conseguenza di una minore alternanza del via libera fra le diverse manovre, non produce tuttavia effetti sul tipo di verifica suggerita che è basata solo su un confronto fra flussi interessanti l'intersezione e capacità e non già sull'efficienza del funzionamento in termini di utilizzazione del tempo da parte delle correnti veicolari confluenti.

La verifica della configurazione dell'intersezione attraverso la semplice relazione proposta richiede preliminarmente la determinazione della capacità dell'area di manovra H_m (ovvero H_{Sat}), operazione abbastanza delicata. Infatti detta capacità oltre che dipendere dalla larghezza dell'area stessa è funzione anche della velocità di transito dei veicoli. La capacità di una sezione stradale, dal suo valore massimo che si realizza in corrispondenza della velocità critica, compresa generalmente fra i 40 e 55 km/h (TRB - HCM, 2000), si riduce progressivamente all'abbassarsi della velocità di marcia fino ad azzerarsi quando quest'ultima si annulla, come è peraltro ovvio non realizzandosi alcun flusso in assenza di movimento. Pertanto si può partire da una capacità orientativa di 2000 vetture/h (che tiene conto di una elevata densità che caratterizza i veicoli in corrispondenza delle intersezioni) corrispondente ad una velocità di circa 40 km/h ed assumere, in prima approssimazione, che la capacità vari linearmente con la velocità ricavando la capacità in corrispondenza di valori misurati della velocità. Naturalmente la capacità di 2.000 veicoli/h assunta per la velocità di 40 km/h va ridotta in presenza di situazioni infrastrutturali o di traffico sfavorevoli.

Ne deriva tra l'altro che un movimento più rapido dei flussi nell'intersezione, realizzabile migliorando la visibilità o riducendo le interferenze da parte di pedoni, trasporto pubblico e sosta o attraverso una regolazione semaforica, ha come conseguenza un aumento della capacità dell'area di manovra e quindi un incremento delle possibilità di soddisfare la verifica preliminare proposta per la capacità. È evidente tuttavia che un aumento della velocità comporta tendenzialmente il peggioramento delle condizioni generali di sicurezza nonché maggiori impatti da traffico.

L'aumento della capacità dell'area di incrocio si può ottenere in misura consistente allargando quest'ultima in modo da far defluire un certo numero di manovre attraverso più di una corsia creando apposite canalizzazioni. In particolare la regolazione semaforica, distribuendo le manovre in intervalli di tempo successivi, rende più facile la ripartizione di una o più manovre contemporanee su più canalizzazioni con sensibili effetti di riduzione del rapporto flusso/capacità.

L'effetto positivo conseguente alla distribuzione delle manovre su più corsie si evidenzia proprio nella regolazione semaforica dove, alla suddivisione di una corrente veicolare fra più corsie in presenza di canalizzazioni, consegue sempre la possibilità di deflusso di ciascuna corsia in modo indipendente da altre con le quali non presenta punti di conflitto.





Per meglio chiarire il vantaggio offerto dalle canalizzazioni, nel prosieguo si fa riferimento allo schema di intersezione a tre rami, che è il più semplice, (figura 15) ed alla relativa matrice che raccoglie i flussi di manovra (tabella 9).

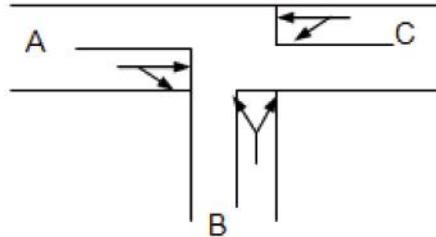


Figura 15
Intersezione tipo a tre bracci

	A	B	C	tot
A	0	H_{AB}	H_{AC}	H_{Ae}
B	H_{BA}	0	H_{BC}	H_{Be}
C	H_{CA}	H_{CB}	0	H_{Ce}
tot	H_{Au}	H_{Bu}	H_{Cu}	

Tabella 9
Schematizzazione matriciale dei flussi di manovra in una intersezione a tre bracci

Si ipotizzi per tale intersezione una regolazione semaforica in tre fasi con fasatura "per provenienza" (consistente nel dare il verde contemporaneamente a tutte le manovre provenienti dallo stesso accesso senza tener conto della destinazione) e l'assenza di specifiche canalizzazioni per le svolte (figura 16). Quest'ultima condizione comporta la disponibilità di una sola corsia per ciascun accesso che obbliga i veicoli ad accodarsi su un'unica colonna indipendentemente dalla destinazione, come rappresentato in figura. È evidente che, nella situazione descritta tipica di accessi di dimensioni minime caratterizzati da una sola corsia confluyente per ciascun ramo, la fasatura *per provenienza* diventa l'unica possibile.

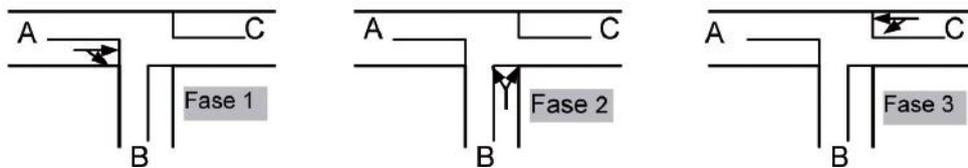


Figura 16
Esempio di fasatura "per provenienza", in tre fasi, per una intersezione a tre bracci senza canalizzazioni

In base a questa fasatura i flussi di calcolo da utilizzare nelle formule per la determinazione del ciclo semaforico e dei tempi di verde, sono rispettivamente:

$$\text{Fase 1} \rightarrow H_1 = H_{Ae} = H_{AB} + H_{AC}$$

$$\text{Fase 2} \rightarrow H_2 = H_{Be} = H_{BA} + H_{BC}$$

$$\text{Fase 3} \rightarrow H_3 = H_{Ce} = H_{CA} + H_{CB}$$



Se invece gli accessi permettono di creare due corsie di canalizzazione su ciascuno di essi, pur mantenendo invariato il tipo di fasatura i flussi di calcolo per le tre fasi semaforiche si riducono sensibilmente, come evidenziato in figura 17, determinando di conseguenza valori del ciclo molto più bassi, ovvero capacità maggiori a parità di ciclo.

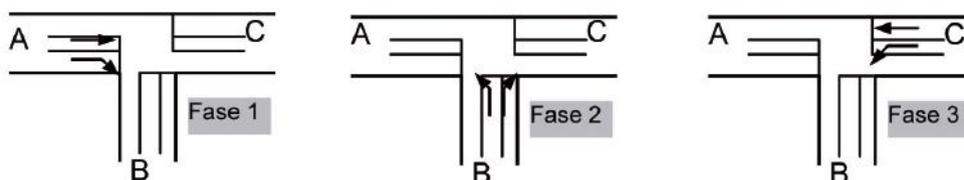


Figura 17

Esempio di fasatura "per provenienza", in tre fasi, per una intersezione a tre bracci con canalizzazioni

Fase 1 → $H_1 = H_{AB}$ [se $H_{AB} > H_{AC}$] oppure $H_1 = H_{AC}$ [se $H_{AC} > H_{AB}$]

Fase 2 → $H_2 = H_{BA}$ [se $H_{BA} > H_{BC}$] oppure $H_2 = H_{BC}$ [se $H_{BC} > H_{BA}$]

Fase 3 → $H_3 = H_{CA}$ [se $H_{CA} > H_{CB}$] oppure $H_3 = H_{CB}$ [se $H_{CB} > H_{CA}$]

In sintesi la suddivisione delle manovre sulle appropriate canalizzazioni impone di assumere come flusso di calcolo per ciascuna fase il maggiore (anziché la somma) dei flussi di manovra che impegnano ciascuna canalizzazione a cui viene dato il via libera contemporaneamente. Ne deriva una sensibile riduzione dei tempi di verde necessari, e quindi del tempo di ciclo, che può raggiungere anche il 50% se le manovre contemporanee presentano gli stessi flussi.

Le canalizzazioni si presentano vantaggiose inoltre per la possibilità di realizzare fasature diverse da quella fin ora ipotizzata. Infatti, cadendo il vincolo del via libera contemporaneo a tutte le manovre provenienti dallo stesso accesso, è possibile la più ampia combinazione di manovre nella stessa fase senza particolari limitazioni se non quella di ridurre al minimo o preferibilmente eliminare i punti di conflitto presenti in ciascuna fase.

Le canalizzazioni possono produrre lo stesso beneficio nelle intersezioni a precedenza in quanto aumentano le dimensioni degli accessi e dell'area di manovra e quindi il numero di corsie percorribili contemporaneamente all'interno di essa, abbattendo il rapporto flusso / capacità.

Con riferimento allo stesso schema di intersezione ma in presenza delle canalizzazioni è possibile ipotizzare la fasatura riportata in figura 18 che ricade nella tipologia detta "per destinazione".

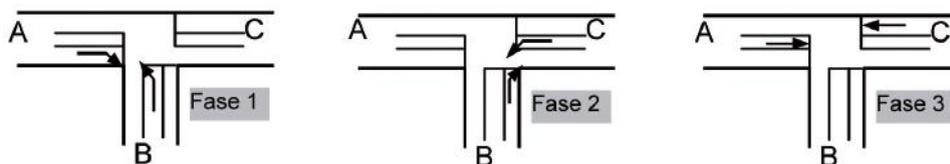


Figura 18

Esempio di fasatura "per destinazione", in tre fasi, per una intersezione a tre bracci con canalizzazioni



Fase 1 → $H_1 = H_{AB}$ [se $H_{AB} > H_{BA}$] oppure $H_1 = H_{BA}$ [se $H_{BA} > H_{AB}$]
 Fase 2 → $H_2 = H_{BC}$ [se $H_{BC} > H_{CB}$] oppure $H_2 = H_{CB}$ [se $H_{CB} > H_{BC}$]
 Fase 3 → $H_3 = H_{AC}$ [se $H_{AC} > H_{CA}$] oppure $H_3 = H_{CA}$ [se $H_{CA} > H_{AC}$]

In presenza di canalizzazioni la fasatura *per destinazione* può risultare più efficiente rispetto a quella *per provenienza* allorché le manovre che si fanno defluire contemporaneamente presentano flussi più prossimi tra loro. In questo caso si realizza un'economia dei tempi di via libera per effetto della riduzione del verde inutilizzato da parte della manovra con flusso minore fra quelle che hanno il via libera nella stessa fase.

Peraltro, nello specifico schema di nodo a tre rami considerato, la fasatura *per destinazione* presenta, rispetto a quella *per provenienza*, l'ulteriore vantaggio di salvaguardare da correnti veicolari un ramo dell'intersezione in ciascuna fase, rendendone possibile il contemporaneo attraversamento da parte dei pedoni senza punti di conflitto con i veicoli. Nello specifico esempio sarà possibile garantire un attraversamento pedonale assolutamente sicuro dei rami C, A e B, rispettivamente nelle fasi 1, 2 e 3.

La possibilità di combinare nella stessa fase manovre aventi diversa provenienza in presenza di una fasatura *per destinazione* e di idonee canalizzazioni può tradursi anche in una riduzione del numero di fasi che come è noto rappresenta un fattore di efficientamento della regolazione dal momento che comporta una riduzione dei perditempo connessi ai cambi di fase (perditempo di verde e di tutto rosso). Una ipotesi di regolazione della stessa intersezione con solo due fasi ed un punto di conflitto nella fase 2 (in figura 19) è di aiuto nella comprensione di quest'ultima considerazione.

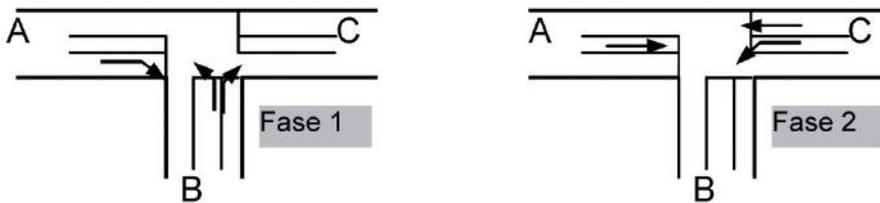


Figura 19
Esempio di fasatura "per destinazione", in due fasi,
per una intersezione a tre bracci con canalizzazioni

La presenza del punto di conflitto nella fase 2 fra le manovre AC e CB comporta tuttavia un sensibile innalzamento del flusso di calcolo H_2 che dovrà tener conto della necessità per le due manovre di un tempo di verde ben maggiore che serve loro ad occupare alternativamente la stessa area. Pertanto i flussi di calcolo riferiti alle due fasi sopra definite saranno:

Fase 1 → $H_1 = H_{AB}$ [se $H_{AB} > H_{BA}$ e $H_{AB} > H_{BC}$]
 oppure $H_1 = H_{BA}$ [se $H_{BA} > H_{AB}$ e $H_{BA} > H_{BC}$]
 oppure $H_1 = H_{BC}$ [se $H_{BC} > H_{AB}$ e $H_{BC} > H_{BA}$]

Fase 2 → $H_2 = (H_{AC} + H_{CB})$ [se $(H_{AC} + H_{CB}) > H_{CA}$]
 oppure $H_2 = H_{CA}$ [se $H_{CA} > (H_{AC} + H_{CB})$]





Le considerazioni fatte al fine di evidenziare l'effetto che le canalizzazioni e, nel caso della regolazione semaforica, la combinazione delle manovre hanno sull'efficienza e quindi sulla capacità delle intersezioni sono valide, con le dovute differenze, per tutte le intersezioni stradali, quindi anche per quelle a precedenza. Queste ultime, benché, come è noto, raggiungano capacità generalmente ridotte, presentano una grande elasticità conseguente a tempi di via libera non predeterminati che, in condizioni di forte carico o di saturazione, tendono ad attribuire alle manovre una capacità pressoché proporzionale al flusso che le impegna, realizzando così una sorta di autoregolazione che invece nella semaforizzazione è raggiungibile soltanto impiegando apparati a controllo adattivo.

A5.5 EFFETTI DELLA MODERAZIONE DEL TRAFFICO SULLA CAPACITÀ DELLE STRADE

Si presentano in questo paragrafo delle considerazioni volte ad evidenziare i riflessi che alcuni interventi di moderazione del traffico producono sulla capacità dell'elemento della rete stradale interessato. Il discorso, che è preceduto da alcuni richiami di teoria del deflusso veicolare, è finalizzato a mettere in luce le situazioni che necessitano di particolare attenzione al fine di evitare eventuali strozzature nella rete stradale conseguenti alla realizzazione non appropriata di dispositivi rallentatori.

Per tutti i sistemi di trasporto in condizioni di flusso ininterrotto e stazionario vale l'equazione generale del deflusso:

$$H = v \cdot \delta(v) \quad [8]$$

con H = flusso o portata in [veicoli/s]

v = velocità in [m/s]

δ = densità in [veicoli/m], funzione di v

Se si indica con d_m il distanziamento metrico medio tra veicoli successivi espresso in [m/veicoli] risulta per definizione:

$$\delta = 1/d_m \quad [14]$$

Per i sistemi a densità libera, quale il sistema stradale, il distanziamento, anch'esso funzione della velocità, è difficilmente esprimibile in forma analitica dal momento che il suo valore è determinato dal comportamento dei conducenti. È possibile comunque affermare che la distanza fra i veicoli accodati cresce all'aumentare della velocità di marcia e decresce al diminuire di quest'ultima come conseguenza del ritardo con cui il veicolo che segue adegua la propria velocità a quello che lo precede. Infatti se le variazioni di velocità (accelerazioni e decelerazioni) si trasmettessero istantaneamente, cioè senza il benché minimo ritardo, da ciascun veicolo a quello che segue, detti veicoli potrebbero viaggiare in sicurezza stando quasi a contatto senza mai toccarsi. Ciò evidentemente non avviene, perché il conducente percepisce visivamente le variazioni di velocità del veicolo che lo precede ed adegua di conseguenza la velocità del proprio, agendo sui comandi (acceleratore o freno) con un certo ritardo; un tempo minimo ma comunque non nullo intercorre fra l'azionamento dei comandi da parte del conducente e gli effetti prodotti dai comandi sul moto del veicolo. Il ritardo complessivo fra la variazione del moto nel veicolo che precede e l'adeguamento conseguente di quello che segue è detto tempo di perce-





zione e reazione. L'impossibilità di eliminare questo ritardo nei sistemi di trasporto a veicoli indipendenti (cioè non fisicamente collegati) obbliga a porre particolare attenzione al mantenimento di una distanza reciproca fra i veicoli accodati per evitare la collisione durante la frenata.

Per quantificare l'entità di tale distanziamento è possibile prendere in considerazione alcune situazioni limite non necessariamente realizzabili nella realtà. Con riferimento alla manovra di frenata dalla velocità di marcia V a velocità 0 effettuata dal veicolo che precede, l'inizio della stessa manovra di pari intensità da parte del veicolo che segue, può avvenire:

- nello stesso istante in cui il veicolo che precede inizia a frenare (ritardo nullo);
- durante la fase di frenatura del veicolo che precede, cioè quando questo non si è ancora arrestato;
- esattamente al termine della fase di frenatura del veicolo che precede nell'istante in cui questo si arresta;
- con un ritardo rispetto all'istante in cui il veicolo che precede si arresta e cioè quando questo è già fermo.

Escludendo il caso (a) che è irrealizzabile per quanto detto in precedenza, nel caso (b) il veicolo (i+1) che segue si avvicina a quello (i) che lo precede, di una distanza in metri pari a:

$$\Delta d = (v_{i+1} - v_i) \cdot r \quad [15]$$

essendo:

v_{i+1} = la velocità di marcia [m/s] del veicolo (i+1) prima dell'azionamento dei freni

v_i = la velocità media del veicolo (i) fra l'istante di inizio della frenata del veicolo (i) e l'istante di inizio della frenata del veicolo (i+1)

r = il ritardo [s] con cui il veicolo che segue inizia la frenata.

Pertanto la distanza di sicurezza deve essere superiore a Δd .

Nelle ipotesi (c) e (d) il problema diventa quello della frenata rispetto ad un ostacolo fisso. Lo spazio di arresto quindi è dato da:

$$s_a = v \cdot r + \frac{v^2}{2a} \quad [16]$$

cioè è somma di un'aliquota di spazio percorsa a velocità costante durante il tempo di percezione e reazione e di un'aliquota di spazio percorso durante la frenata vera a propria. Il distanziamento fra i veicoli accodati deve essere almeno superiore s_a .

Poiché il ritardo è $r = 1 \div 2$ s, e quindi generalmente inferiore al tempo di arresto pari a $t_a = v/a$, se la velocità non è inferiore a 35 km/h (circa 10 m/s) e contemporaneamente la decelerazione di frenatura non supera i 5 m/s² come di solito avviene, lo schema che riproduce il fenomeno in esame è generalmente rappresentato dal caso (b). Di conseguenza ogni rallentamento dei veicoli accodati comporta una riduzione della distanza fra i veicoli (i) ed (i+1) espresso dalla [15].

Allo stesso modo ogni volta che il veicolo (i) accelera, la distanza dal veicolo (i+1) che segue aumenta di una grandezza pari a

$$\Delta d = (v_i - v_{i+1}) \cdot r \quad [17]$$

essendo v_i la velocità media del veicolo (i) fra la velocità tenuta nell'istante in cui lo stesso inizia ad accelerare e quella nell'istante in cui inizia ad accelerare il veicolo (i+1) e v_{i+1} la velocità del veicolo (i+1) prima che cominci ad accelerare dietro ad (i).



Sembrirebbe quindi che il distanziamento minimo fra i veicoli rimanga costante per valori costanti del ritardo che in sostanza rappresenta, come già detto, il tempo di percezione e reazione, ma non è così. Infatti se, per esempio nella fase di frenatura, anziché di un'accelerazione media si tiene conto delle forze in gioco durante la frenata e si vanno a calcolare gli spazi di arresto del veicolo (30) per velocità crescenti per esempio da 10 a 100 km/h e poi si misurano le differenze degli stessi spazi di arresto calcolati su valori successivi degli intervalli di velocità, si può rilevare che dette differenze crescono con la velocità come evidenziato nel diagramma di figura 20.

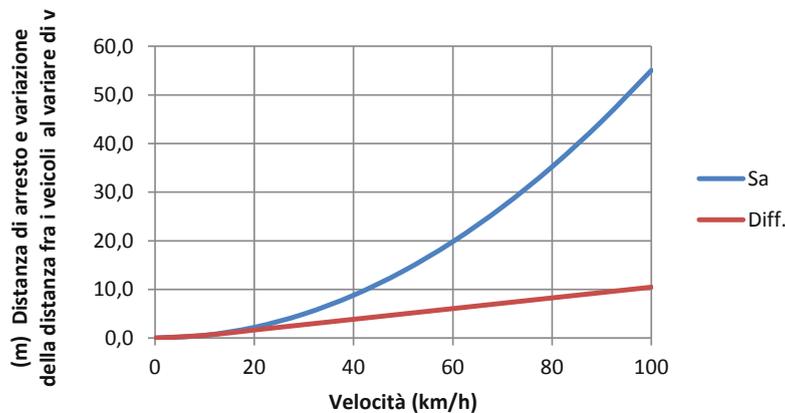


Figura 20
Spazio di arresto S_a e variazione della distanza fra i veicoli al variare della velocità

Pertanto la variazione di distanza fra i veicoli accodati conseguente al ritardo con cui si attuano le variazioni di velocità nel veicolo che segue rispetto a quello che precede, già espressa attraverso la relazione [15], è tanto maggiore quanto più alte sono le velocità a cui si viaggia, a parità di differenza di velocità ($v_j - v_{j+1}$). Ne consegue che le variazioni di spazio considerate fra veicoli successivi accodati sono crescenti con la velocità di marcia del plotone di veicoli, a parità di ritardo r nell'attuazione della variazione di velocità.

Ciò chiarisce il fenomeno rilevabile nella realtà di un distanziamento fra i veicoli accodati che cresce con la velocità del plotone e che fra l'altro è necessario per garantire l'arresto di ciascun veicolo dietro quello che lo precede. La spiegazione sta nel fatto che lo spazio necessario per rallentare è proporzionale all'energia cinetica da dissipare con i freni e questa a sua volta è funzione del quadrato della velocità, per cui gli stessi decrementi di velocità attuati partendo da velocità diverse richiedo-

(30) Spazi di arresto s_a calcolati, tenendo conto delle forze agenti sul veicolo, con la nota formula

$$s_a = \frac{102 \cdot \alpha \cdot v^2}{2 \cdot [(\mu \pm i + \rho) + 1000 \cdot f_a]}$$

dove:

α = coefficiente che tiene conto dell'inerzia aggiuntiva connessa alle masse rotanti del veicolo

μ = resistenza al rotolamento [kg/t]

$+i$ = resistenza alla pendenza (1 kg/t per ogni per mille di pendenza)

ρ = resistenza in curva (assunta =0)

f_a = coefficiente di aderenza

v = velocità all'inizio della frenata [m/s]

no uno spazio percorso tanto maggiore quanto più elevata è la velocità da cui inizia il rallentamento. Lo stesso discorso è valido in accelerazione: dovendosi in questo caso fornire al veicolo energia cinetica che è funzione quadratica della velocità ne consegue che aumenti di velocità della stessa entità richiedono tempi e spazi maggiori, a parità forza accelerante prodotta dal motore, quanto più elevata è la velocità da cui inizia l'accelerazione.

In sintesi si può affermare che, al crescere della velocità, il distanziamento metrico dm fra i veicoli cresce con legge più che lineare e di conseguenza la densità δ decresce con legge meno che lineare. Del resto i rilievi sperimentali riportati dal TRB-HCM (2000) confermano quanto dedotto, dal momento che rilevano generalmente una proporzionalità inversa di tipo non lineare fra densità e velocità.

Dalla non linearità della funzione $\delta(v)$ scaturisce l'andamento a due rami, uno crescente (instabile) l'altro decrescente (stabile), che caratterizza la curva di deflusso $H(v)$ in campo extraurbano in condizioni di flusso ininterrotto (riportata in figura 21 a titolo di esempio), così come risulta da analisi teoriche e dagli studi sperimentali dell'HCM.

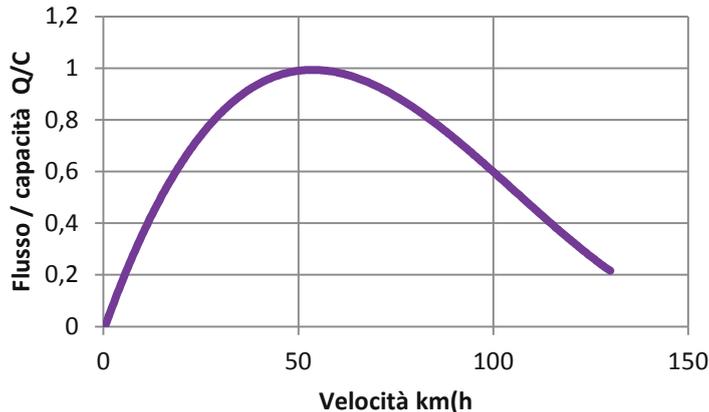


Figura 21

Generica curva di deflusso di una corsia stradale extraurbana in condizioni di flusso ininterrotto

Dalla curva di figura 21 risulta evidente che, a prescindere dalle cause che possono determinarne la variazione, una riduzione di velocità, spontanea o imposta, produce un aumento oppure una diminuzione del flusso smaltibile (quindi del rapporto flusso/capacità H/C) a seconda che ci si trovi rispettivamente nel campo delle velocità maggiori o minori della cosiddetta velocità critica (o di flusso massimo) che si realizza intorno ai 45 - 55 km/h.

Quanto detto trova conferma analizzando la funzione del deflusso [8] di seguito richiamata.

$$H = v \cdot \delta(v) \quad [8]$$

Si può osservare infatti che il flusso che può transitare su una strada è il risultato del prodotto fra la velocità e la densità dove quest'ultima è funzione inversa, non lineare, della stessa velocità. Poiché al decrescere della velocità v , la densità δ aumenta (i veicoli in coda si avvicinano l'un l'altro quando rallentano), non è possibi-



le quindi affermare a priori che il flusso H aumenti o diminuisca in quanto il risultato dipende dalla sensibilità, alla variazione di velocità, dei due fattori v e $\delta(v)$; in altri termini, quello dei due che varia più velocemente influenza maggiormente il prodotto. Pertanto quando v decresce, se è δ a crescere più velocemente di quanto decresca la stessa v , ne deriva un aumento del flusso smaltibile, al contrario se δ cresce più lentamente di quanto decresce v , ne consegue una riduzione del flusso H .

In sostanza, poiché v compare nella [8] alla prima potenza mentre la densità, che è per definizione l'inverso del distanziamento metrico fra i veicoli, è funzione non lineare della velocità (per quanto detto precedentemente), al ridursi di v , δ cresce prima rapidamente (in corrispondenza di valori elevati della velocità), poi sempre più lentamente per attestarsi ad un valore massimo corrispondente alla condizione di veicoli fermi in coda che presentano distanziamento minimo quasi nullo. Come conseguenza il flusso H , riducendosi la velocità dai valori massimi a zero, prima cresce, fino a velocità dell'ordine dei 50 km/h poi decresce fino a raggiungere il valore nullo in corrispondenza dei veicoli fermi alla minima distanza e cioè alla massima densità. Questa descrizione è peraltro compatibile con l'annullarsi del flusso quando la velocità si azzerà (veicoli fermi). Naturalmente la curva di che trattasi rappresenta condizioni di funzionamento ininterrotto e quindi sostanziale assenza di interferenze esterne, situazione che raramente si realizza sulle strade urbane.

In conclusione è possibile senza dubbio affermare che, se riduzioni di velocità nel campo di valori superiori ai 50 km/h sono benefiche per il flusso smaltibile dalla strada e cioè per la capacità, accade il contrario per velocità comprese nell'intervallo 0-50 km/h che è il campo di velocità tipicamente urbane. Quindi è bene sempre tenere in considerazione che, in area urbana, qualsiasi riduzione della velocità di marcia imposta ai veicoli dalle stesse condizioni di deflusso o da interferenze esterne o limiti di velocità e rallentatori ha come conseguenza una riduzione della capacità stradale con cui bisogna fare i conti. Detta riduzione, tuttavia, non dà luogo ad un peggioramento complessivo del deflusso se non si realizza in punti critici della rete. Infatti, come già discusso a proposito della capacità fisica della strada, gli archi della rete urbana hanno capacità generalmente superiore rispetto agli accessi delle intersezioni e sono quindi queste ultime che determinano la capacità complessiva degli archi in esse confluenti.

Pertanto è formalmente corretto verificare la capacità residua della strada, in relazione alla domanda da servire, per velocità inferiori ai 45-50 km/h. La capacità lungo l'arco, ridotta per effetto del limite imposto alla velocità, non dovrebbe risultare minore di quella dell'accesso all'intersezione in cui l'arco termina. Se ciò dovesse accadere, potrebbe realizzarsi un peggioramento delle condizioni di deflusso lungo l'arco in questione. Naturalmente queste considerazioni esulano dagli effetti prodotti dalla riduzione di velocità sui tempi di percorrenza e sull'accessibilità. Infatti provvedimenti finalizzati alla riduzione delle velocità massime lungo gli archi della rete stradale riducono in linea di principio la velocità media, sebbene tale riduzione risulti trascurabile qualora gli archi abbiano lunghezza molto ridotta e quindi gli itinerari presentino una distanza media fra le intersezioni successive molto bassa oppure sugli archi si realizzino velocità fortemente variabili lungo il loro sviluppo.

Per quanto attiene il livello di servizio, ferma restando l'esistenza di un rapporto diretto fra questo e la velocità ampiamente trattato nell'HCM per i diversi tipi di strade, va tuttavia considerato che la velocità commerciale complessiva degli spostamenti, che è il più importante indicatore del livello di prestazione offerto dalla rete stradale urbana, è sensibilmente influenzata dai ritardi connessi all'attraversamento delle numerose intersezioni. Pertanto è da ritenere che la riduzione del livello di





servizio complessivo di un intero itinerario conseguente all'imposizione di limiti di velocità inferiori ai 50 km/h possa risultare complessivamente contenuta. Tra l'altro il maggiore costo generalizzato dello spostamento effettuato su strada con limiti di velocità ridotti è uno degli strumenti più efficaci per deviare su itinerari alternativi il traffico di attraversamento che richiede velocità più elevate e quindi ottenere anche una riduzione dei flussi presenti sull'itinerario trattato.

Riguardo all'efficacia del rallentamento imposto è opportuno fare altre riflessioni.

In linea di principio il contenimento delle velocità massime lungo una strada può realizzarsi operando nei due modi di seguito descritti con riferimento alla figura 22.

- Riducendo direttamente la velocità di flusso libero del tronco stradale considerato (e quindi la velocità possibile a parità di flusso) per mezzo di dispositivi che rendano disuniforme la pavimentazione (dossi, rallentatori acustici e ottici) ovvero l'asse stradale (curve contrapposte interruzione della visuale). Ciò implica una modifica della curva di deflusso consistente nella riduzione del valore dell'intercetta sull'asse delle velocità (velocità di flusso libero). Pertanto la curva di deflusso, rappresentata schematicamente con la linea continua, si trasforma in quella indicata con il tratteggio e di conseguenza le condizioni operative rappresentate da un generico punto A si modificano in quelle indicate dal punto B sulla nuova curva di deflusso.
- Riducendo la capacità offerta lungo l'arco stradale (di solito maggiore di quella disponibile nelle estremità dello stesso arco in corrispondenza delle intersezioni) attraverso la riduzione del numero di corsie o della loro larghezza. In tal modo la curva di deflusso relativa alla capacità resta sostanzialmente invariata ma l'innalzamento del rapporto H/C , conseguente alla riduzione della capacità C, sposta le condizioni operative dal generico punto A al punto C caratterizzato da un valore più basso della velocità possibile. L'efficacia di questi ultimi interventi è evidentemente proporzionale ai flussi in transito e diventa irrilevante in regime di flusso libero e quindi, per esempio, nelle ore notturne.

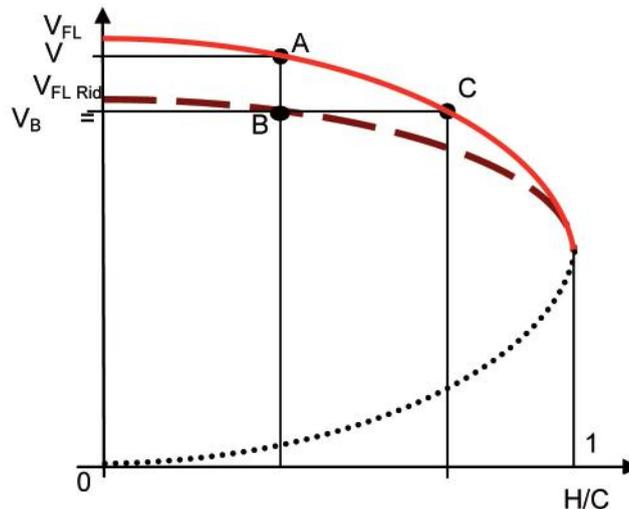


Figura 22
Condizioni di deflusso in assenza di rallentatori (punto A)
ed in presenza di di rallentatori (punti B e C)

La riduzione dei volumi di traffico, pur ottenendosi di solito contestualmente





all'abbassamento delle velocità massime, è più sensibile se si attuano provvedimenti riduttivi del livello dell'interconnessione della rete (impedimenti di svolte e di accessi) finalizzati ad escludere la strada da trattare dagli itinerari interessati da flussi di attraversamento elevati.

Tutti i dispositivi che producono un rallentamento nelle correnti veicolari e quindi, in linea di principio, un aumento dei tempi di viaggio e del costo generalizzato, possono produrre una deviazione di parte del traffico di attraversamento su altri itinerari ed è quindi opportuno assicurarsi che, su questi ultimi, i flussi conseguenti all'intervento non risultino incompatibili con la capacità o con l'ambiente. Il volume di traffico di attraversamento deviato dall'itinerario considerato per effetto della realizzazione di dispositivi rallentatori è tuttavia non facilmente prevedibile sulla base della sola riduzione della velocità ottenuta. Ciò perché, come è evidente, la scelta di percorsi alternativi da parte del traffico di attraversamento è strettamente dipendente dal tempo di viaggio (o al costo generalizzato) connesso a tali alternative che a sua volta dipende dalla configurazione della rete stradale. Pertanto una stima dell'efficacia dei rallentatori nel ridurre il traffico di attraversamento può essere fatta solo attraverso un'assegnazione della matrice origine - destinazione degli spostamenti al grafo della rete stradale nel quale ai vari archi sia associato il costo conseguente alla presenza dei dispositivi di moderazione della velocità. È evidente altresì che interventi volti a contenere la velocità su itinerari importanti possono produrre sensibili variazioni nella distribuzione dei flussi su diversi percorsi con conseguenti possibili variazioni su alcuni archi.

Prima di attuare qualsiasi intervento che abbassa sensibilmente la capacità di un arco della rete stradale bisogna verificare la nuova capacità in relazione al flusso di domanda che si vuole servire. Particolarmente importante è inoltre verificare le capacità ed i livelli di servizio nelle intersezioni oggetto di provvedimenti di moderazione del traffico che possono farne variare sensibilmente i parametri del funzionamento. Nei nodi vanno guardati con particolare attenzione tutti i provvedimenti che comportano un restringimento della sezione degli accessi, in quanto rendono più difficili le canalizzazioni ed incidono negativamente sulla capacità.

Le due figure 23 e 24 schematizzano il restringimento della sezione stradale finalizzato alla riduzione della velocità (e contemporaneamente all'aumento della sicurezza dell'attraversamento pedonale) ubicato rispettivamente lungo un arco e in corrispondenza degli accessi all'intersezione. Entrambi causano una riduzione della capacità stradale come conseguenza della riduzione della velocità e della sezione stradale ma la seconda ubicazione si presenta in linea di principio più critica della prima. Infatti mentre in generale una riduzione della capacità lungo l'arco stradale lontano dall'intersezione non si riflette negativamente sul deflusso se la capacità residua non è inferiore a quella dell'intersezione a valle, la riduzione di capacità di quest'ultima va a penalizzare un punto caratterizzato di per sé da minore capacità rispetto allo stesso arco confluyente e quindi già critico sotto questo aspetto.



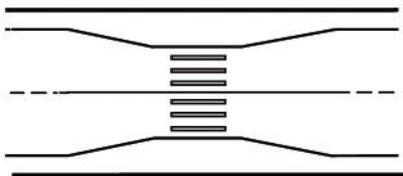


Figura 23
Restringimento della carreggiata lungo un tronco stradale

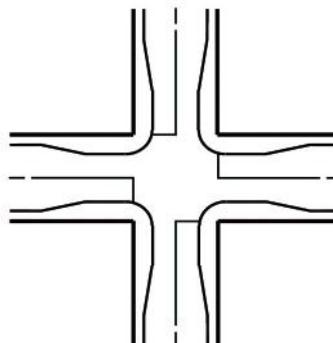


Figura 24
Restringimento della carreggiata stradale in corrispondenza degli accessi

A5.6 REGOLAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE

La gestione del traffico veicolare riveste grande importanza per il funzionamento della rete stradale urbana caratterizzata generalmente da una capacità complessivamente modesta rispetto alla domanda che è peraltro concentrata in alcune ore del giorno. La gestione del traffico comporta la messa in atto di interventi di varia natura e portata finalizzati a potenziare e razionalizzare l'offerta e/o ad orientare la domanda verso forme maggiormente compatibili con l'offerta e con il territorio interessato.

Gli obiettivi solitamente perseguiti sono:

- la fluidificazione del traffico intesa come aumento della velocità media di marcia di tutti i veicoli ottenuta attraverso una riduzione del numero e dell'entità dei rallentamenti e di conseguenza un aumento della regolarità di marcia;
- l'aumento della capacità della rete stradale e soprattutto dei punti critici;
- l'aumento dell'offerta di sosta a cui conseguono minori tempi di ricerca del parcheggio e riduzioni dei tempi di completamento dello spostamento mediante la modalità pedonale utilizzata dal parcheggio alla destinazione;
- l'aumento della velocità commerciale dei mezzi pubblici stradali;
- le facilitazioni per la mobilità pedonale e il miglioramento delle condizioni ambientali;
- la riduzione della domanda di trasporto con mezzo proprio;
- la riduzione delle punte di domanda di mobilità.

La scelta degli interventi da attuare va condotta individuando gli obiettivi da perseguire in via prioritaria.

Le tecniche di gestione del traffico possono dividersi in tre categorie:

- a infrastrutturali
- b di regolazione (anche temporanea)
- c di ottimizzazione del sistema mediante informazione all'utenza e/o misure di tariffazione.

Ciascuna tecnica si realizza attraverso interventi che presentano costi diversi, distribuiti in modo differente fra utenti ed erario, ed eventuali ricavi e che sono in grado di perseguire in misura differente i vari obiettivi.

In particolare, le tecniche di gestione infrastrutturali, consistenti nella realizzazione di nuove strade, intersezioni e parcheggi o potenziamento degli esistenti, possono contribuire in modo consistente ad aumentare la capacità della rete stradale intervenendo in modo mirato a migliorare i punti o le aree critiche e quindi permetten-





do di raggiungere ottimi risultati in termini di fluidificazione delle correnti veicolari, di miglioramento dell'accessibilità e delle condizioni di vivibilità, ma presentano generalmente costi rilevanti per l'erario e possono incidere negativamente sulle condizioni ambientali e paesaggistiche. Solo da alcune realizzazioni (per esempio i parcheggi) è possibile ottenere ricavi di gestione e quindi ipotizzare la partecipazione di capitali privati al finanziamento dell'opera.

Fra le tecniche di gestione di tipo infrastrutturale possono comprendersi anche interventi, talvolta fatti ricadere fra le tecniche di regolazione per via del costo decisamente modesto, volti a modificare in modo non consistente la piattaforma stradale. Fra questi si annoverano gli interventi per ridurre le velocità, quali rallentatori, deviazioni planimetriche e restringimenti della carreggiata, nonché per predisporre attraversamenti pedonali, corsie preferenziali, servizi alle fermate del trasporto pubblico, piste ciclabili, marciapiedi e arredo urbano attraverso i quali è possibile migliorare le condizioni di sicurezza ed ambientali e l'accessibilità, soprattutto per alcune componenti non motorizzate del traffico, quali pedoni e ciclisti.

La regolazione del traffico comprende una serie di provvedimenti, essenzialmente organizzativi, finalizzati ad adattare reciprocamente la domanda di trasporto stradale e l'offerta esistente per raggiungere specifici obiettivi, senza far ricorso a modifiche infrastrutturali della rete stradale. La regolazione del traffico può rappresentare una soluzione di medio lungo periodo per migliorare le condizioni di un'area dove non siano previste nuove infrastrutture di trasporto, oppure una misura di breve periodo, anche in attesa che si realizzino interventi di maggiore impegno. Specifici schemi di regolazione del traffico possono essere attuati contestualmente all'entrata in esercizio di opere infrastrutturali importanti, quali una nuova strada o un parcheggio, per migliorare e potenziare l'efficacia di queste ultime integrandole opportunamente nella rete di offerta. Gli interventi di regolazione della circolazione producono generalmente effetti molto più contenuti rispetto a quelli infrastrutturali e presentano quindi una efficacia limitata nel tempo; pertanto rientrano nella categoria degli interventi di breve periodo.

Le tecniche di regolazione, attraverso le quali è possibile ottenere la fluidificazione del traffico, il miglioramento dell'accessibilità e la riduzione degli incidenti, si realizzano prevalentemente attraverso il controllo delle intersezioni con semafori o piccole rotonde, con l'imposizione di limitazioni alle manovre nelle intersezioni, alla velocità, al parcheggio e all'accesso di tutti o di determinati veicoli in alcune strade in un determinato senso di marcia o in entrambi.

È possibile altresì perseguire gli stessi obiettivi delle tecniche precedentemente citate anche mettendo in atto interventi di gestione che mirano ad ottimizzare il sistema della mobilità indirizzando la domanda verso un uso più razionale dell'offerta esistente. Fra gli interventi di orientamento della domanda è possibile distinguere quelli basati sull'informazione all'utenza circa l'offerta e le condizioni di saturazione, da quelli basati sull'imposizione di una tariffazione per la mobilità o la sosta che peraltro produce proventi riutilizzabili nel settore. Il tipo di informazione dinamica più frequentemente offerto all'utenza attiene alle condizioni del traffico ed al riempimento delle infrastrutture di sosta nonché al tempo di attesa alle fermate del trasporto pubblico.

Il tema della regolazione della circolazione, ampiamente sviluppato a livello di pratica applicativa da parte degli operatori del settore, non è stato affatto sistematizzato mancando la letteratura di analisi e riflessioni riguardanti gli effetti sulla capacità, sui tempi di percorrenza, sulle diverse componenti della mobilità e sull'ambiente delle tipologie più comuni di intervento. I provvedimenti più efficaci nel perseguire la





fluidificazione delle correnti veicolari sono quelli che agiscono sulle intersezioni, dal momento che, come è noto, queste ultime rappresentano punti critici della rete in quanto dispongono di minore capacità rispetto alle strade di accesso. I provvedimenti più comuni e certamente più efficaci sono rappresentati dal divieto di manovra e dal divieto di accesso ad uno o più rami che si traduce in senso unico di marcia sui rami in questione, almeno per il tratto compreso fra l'intersezione in cui è apposto tale divieto e quella successiva sullo stesso ramo. Questi provvedimenti concettualmente diversi sono accomunati dall'obiettivo di migliorare il funzionamento delle intersezioni. Infatti entrambi riducono i punti di conflitto e quindi aumentano la capacità del nodo, cancellando la possibilità di effettuare alcune manovre in corrispondenza delle intersezioni o perché espressamente vietate o perché rese impossibili dai divieti di accesso ad alcune strade confluenti. Tuttavia è possibile adottare sensi unici di marcia anche con finalità diverse, ad esempio il miglioramento del deflusso su strade particolarmente strette oppure la riserva di parte della carreggiata stradale ad altre componenti del traffico urbano quali la sosta, il trasporto pubblico, le biciclette o i pedoni.

Atteso che il numero massimo di manovre possibili M_{max} in una intersezione ad N bracci o accessi è quello che permette di andare da ciascun accesso a tutti gli altri e quindi:

$$M_{max} = N \cdot (N - 1) \quad [18]$$

La presenza di divieti di manovra sottrae ad M_{max} il numero di quelle vietate, mentre la presenza di divieti di accesso in numero di K (nel senso defluente dall'intersezione) vale una riduzione di $(N - 1)$ manovre per ciascun accesso vietato in quanto rende impossibile indirizzarsi sull'accesso impedito provenendo da qualunque altro accesso. Pertanto l'inserimento di quest'ultimo provvedimento comporta un numero di manovre residuo dato dalla:

$$M = N \cdot (N - 1) - K \cdot (N - 1) \quad [19]$$

Rapportando la riduzione di manovre $[K \cdot (N - 1)]$ al numero di manovre massimo possibile dato dalla [18] si ottiene una misura del rendimento R dell'intervento di regolazione, in termini di eliminazione di manovre e conseguentemente di punti di conflitto, ottenuto attraverso l'inserimento di divieti di accesso ai rami dell'intersezione. Il miglioramento nel funzionamento dell'intersezione e quindi nei tempi di attesa o nella capacità degli accessi rimanenti è quindi proporzionale a tale misura nell'ipotesi che i flussi di tutte le manovre, sia quelle eliminate, sia quelle ancora consentite, siano fra loro uguali.

$$R = \frac{K}{N} \quad [20]$$

Dove naturalmente è $K \leq (N - 1)$

Si discutono di seguito vantaggi e svantaggi di un provvedimento rispetto all'altro.

Il *divieto di manovra*, che consiste nell'impedire alcune manovre nell'intersezione (di solito la svolta a sinistra) presenta il grande vantaggio, rispetto al senso unico di marcia, di produrre ripercussioni decisamente limitate sul funzionamento della rete stradale. Infatti il divieto si traduce nello spostamento della stessa manovra all'intersezione successiva o precedente dell'itinerario considerato. Ciò quasi





sempre ha come conseguenza uno spostamento verso queste intersezioni del flusso di manovra interessato con evidente facilità di prevedere le variazioni dei flussi che impegnano le diverse manovre senza dover necessariamente effettuare un'assegnazione della domanda alla rete stradale. Il vantaggio di un impatto limitato sulla circolazione si traduce tra l'altro nella possibilità, per il guidatore, di trovare facilmente un'alternativa al percorso impedito senza allontanarsi sensibilmente da quest'ultimo.

Per chiarire questa riflessione è possibile fare riferimento alla figura 25 che rappresenta due intersezioni successive su un dato itinerario. Ipotizzando di vietare la svolta FE e di riscontrare la convenienza per i veicoli a svoltare all'intersezione successiva anziché a quella precedente è evidente che, in linea di massima, il flusso relativo a questa manovra si andrà ad aggiungere a quello della manovra di attraversamento FC e con questo raggiungerà l'intersezione successiva dove invece si andrà ad aggiungere al flusso della manovra di svolta CB che ha la stessa direzione di FC. Quindi il flusso in questione lo ritroveremo sul ramo B mentre avrebbe percorso il ramo E in assenza del divieto imposto. Naturalmente ciò corrisponde tanto più al vero quanto più breve è il ramo C compreso fra le due intersezioni considerate, quanto più la rete stradale si presenta a maglie regolari e fitte ed a condizione che sia possibile la svolta CB. Non si può comunque escludere a priori che qualche veicolo scelga una diversa alternativa di percorso.

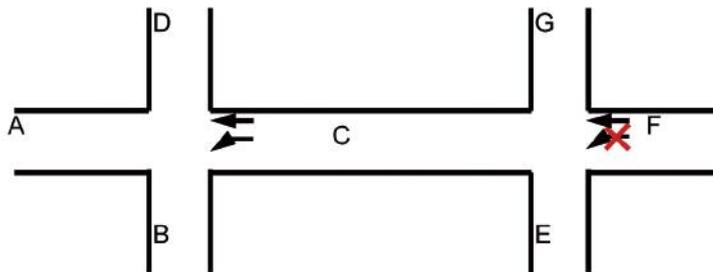


Figura 25

Schema di due intersezioni successive con una manovra vietata

Al contrario, il *senso unico di marcia*, conseguenza di un divieto di accesso imposto nell'intersezione verso una delle strade che in essa si incrociano (per esempio il ramo E), è più efficace, nel migliorare il funzionamento del nodo, rispetto al divieto di una manovra, perché elimina contemporaneamente tre manovre cioè le tre defluenti verso E da tutti gli altri rami. Tuttavia il provvedimento in questione comporta variazioni nell'assetto dei flussi di manovra del nodo più difficilmente stimabili con semplici considerazioni circa le possibili alternative di percorso. Ciò è ancora più vero in presenza di una rete a maglia irregolare riscontrabile di solito in città collinari. Peraltro è sempre da considerare che i sensi unici, più dei divieti di manovra, allungano i percorsi che impegnavano archi stradali su cui tali limitazioni sono imposte. Detto allungamento non è tuttavia stimabile a priori perché dipende dal disegno della rete ma cresce sensibilmente in presenza di reti a maglia irregolare o diradata. Il problema dell'allungamento dei percorsi conseguente all'attuazione di sensi unici di marcia non è trascurabile perché comporta un aumento dei tempi di viaggio e ciò, oltre a far crescere il costo generalizzato, implica una maggiore permanenza in circolazione degli stessi veicoli con conseguente aumento dei volumi di traffico. Naturalmente questo effetto non può essere quantificato se non utilizzando idonei modelli di previsione.





Un altro vantaggio del divieto di manovra rispetto al senso unico di marcia consiste nella grande flessibilità e selettività di questo provvedimento. Infatti mentre il divieto di accesso su una strada rende impossibili verso la stessa strada tante manovre quante sono gli altri rami che si incontrano nell'intersezione considerata, il divieto di manovra opera su ciascuna manovra e quindi può essere imposto a manovre confluenti o defluenti verso rami differenti dell'intersezione.

Il senso unico di marcia presenta tuttavia il vantaggio, rispetto al divieto di manovra, di ricadere fra i provvedimenti auto-rispettati (self-enforcing). Questa caratteristica, di solito propria dei provvedimenti di moderazione del traffico, si traduce nella elevata probabilità che l'imposizione sia rispettata anche in assenza di controllo e quindi nella assoluta economicità di gestione. Lo stesso non può dirsi per il divieto di manovra che si presta maggiormente ad essere eluso dal momento che l'infrazione dura solo qualche secondo. Invece se si volesse percorrere contro mano una strada a senso unico, si rischierebbe, oltre ad un grave incidente, di incappare in un controllo lungo il percorso che dura un tempo non trascurabile.

Al senso unico di marcia sono attribuibili infine altri aspetti positivi e negativi che non agiscono direttamente sulle intersezioni. Infatti a vantaggio di questo provvedimento possiamo certamente annoverare il recupero di spazio conseguente al liberarsi di almeno una corsia nel senso di marcia vietato. Detto spazio può essere utilizzato per aumentare la capacità della strada nel senso di marcia consentito oppure per realizzare una corsia riservata per il transito dei veicoli del trasporto pubblico nel senso di marcia opposto a quello consentito a tutti i veicoli. Diversamente è possibile impegnare lo spazio resosi disponibile per aumentare la capacità di sosta disponendo stalli ai margini della carreggiata oppure ed anche per favorire la pedonalità allargando i marciapiedi.

Ben sapendo che non esiste una soluzione universalmente valida, è opportuno esporre alcune riflessioni riguardo alle alternative di utilizzo dello spazio lasciato libero sulla carreggiata dal senso unico di marcia, dal momento che ciascuna di esse presenta vantaggi e svantaggi. È bene precisare infatti che l'aumento della capacità stradale ottenibile utilizzando, come corsia aggiuntiva nel senso di marcia consentito, lo spazio resosi disponibile sulla carreggiata può risultare inutile se l'intersezione a valle non può offrire una capacità adeguata a quella della strada con un accesso di larghezza doppia. Peraltro la marcia su due o più corsie parallele aumenta consistentemente il numero di sorpassi, la velocità massima e l'incidentalità. A questa scelta andrebbero quindi associati interventi di moderazione del traffico finalizzati essenzialmente alla riduzione delle velocità massime. D'altra parte è pure vero che la presenza di una sola corsia di marcia rende il funzionamento della strada poco affidabile poiché impedisce il deflusso nel caso di avaria di un veicolo di grandi dimensioni e peraltro rende molto difficile, per mezzi di soccorso, il sorpasso dei veicoli accodati. Pertanto la scelta di utilizzare la corsia in senso opposto per parcheggi o marciapiedi deve comunque lasciare libera una corsia di marcia di dimensioni tali da permettere il sorpasso nei casi eccezionali citati pur impedendolo in condizioni di marcia normali.

Favorevole sotto molti aspetti è la istituzione di una corsia riservata al trasporto pubblico in direzione di marcia opposta a quella degli altri veicoli. Questo provvedimento, oltre a rispondere all'obiettivo universalmente condiviso di facilitare e velocizzare la marcia dei mezzi pubblici di superficie, rappresenta un'esigenza se non si vuole ridurre l'accessibilità al trasporto pubblico. Infatti se il servizio è offerto lungo la strada in questione in un solo senso di marcia, si costringe chi intende utilizzarlo per andare in senso opposto a spostarsi a piedi su un'altra strada servi-





ta dai mezzi pubblici nel senso richiesto allungando i tempi di accesso alla fermata. Tuttavia, in linea di principio, l'esistenza di una corsia riservata si giustifica, se non necessaria per motivi di sicurezza o diversi, in presenza di un servizio sufficientemente intenso da impegnare la strada, nel senso preso in esame, con numerose corse per ora; diversamente la conseguente sottrazione di spazio ai veicoli non privilegiati che presentano flussi consistenti non trova a supporto motivazioni basate sull'efficienza nell'uso dell'infrastruttura. È possibile a tal fine confrontare, sulla base delle autovetture e degli autobus effettivamente rilevati e dei relativi coefficienti medi di riempimento, il flusso in termini di passeggeri/ora trasportati dai mezzi privati e da quelli pubblici lungo la strada in questione su di una corsia di marcia e quindi supportare con tali quantità le considerazioni circa l'efficienza complessiva raggiungibile con e senza la corsia riservata.

L'utilizzo dello spazio disponibile per realizzare nuovi parcheggi, sebbene molto gradito agli automobilisti, specie se residenti lungo la strada, va valutato con attenzione per le ripercussioni negative che produce sul deflusso veicolare. Infatti le manovre di ingresso e uscita dagli stalli su strada possono rallentare notevolmente il flusso in transito riducendo sensibilmente la capacità della strada; ciò non costituisce un problema finché detta capacità non diventa inferiore a quella dell'accesso della stessa strada all'intersezione a valle. Il provvedimento va quindi studiato quantificando, con le metodologie sperimentali presenti in letteratura (si veda per esempio Cappelli et al., 2000), il rallentamento prodotto dalle manovre di parcheggio sul flusso in transito e quindi la conseguente capacità della strada, assicurandosi che non scenda al di sotto di quella dell'accesso all'intersezione a valle. Qualora si riscontrasse questo problema è possibile comunque limitare il rallentamento riducendo il numero di stalli oppure disponendoli in modo più favorevole (p.es. a spina con opportuna inclinazione) oppure operando una regolamentazione idonea della sosta. Al fine di ridurre il numero di manovre di ingresso e uscita dagli stalli senza ridurre il numero di questi ultimi è possibile favorire la sosta dei residenti a discapito degli avventori concedendo ai primi permessi specifici o addirittura un certo numero di stalli ad essi riservati, oppure imporre una tariffazione opportunamente decrescente con la durata della sosta così da indurre una permanenza prolungata nei posti. Per contro ciò non favorisce l'accessibilità perché diminuisce la probabilità di trovare un parcheggio libero e scoraggia chi ha esigenze molto limitate nel tempo, di permanenza in zona. Infine è bene non dimenticare che l'aumento dell'offerta di sosta fa crescere la domanda di spostamenti su autovettura privata sottraendola al trasporto pubblico con conseguente aumento dei flussi veicolari in circolazione.

La tabelle 10, 11 e 12 mettono a confronto i due provvedimenti di regolazione discussi.



Aspetti da considerare e relativa importanza	Provvedimento nell'intersezione	
	Divieto di manovra	Divieto di accesso (senso unico)
Miglioramento del deflusso nelle intersezioni (riduzione punti di conflitto)	M	H
Possibilità di intervenire indipendentemente su ciascuna delle manovre più critiche	H	L
Allungamento dei percorsi di ritorno (possibile aumento dei flussi)	L/M	M/L
Facilità di stimare i flussi dopo l'intervento (senza effettuare l'assegnazione)	H/M	M/L
Probabilità che il provvedimento sia rispettato in assenza di controllo	M/L	H
Disponibilità di superficie stradale libera dal traffico veicolare (da attribuire ad altre componenti di traffico - pedonale, trasporto pubblico, sosta)	0	H
Riduzione dell'accessibilità al trasporto pubblico (se non si dispone di una corsia preferenziale nel senso di marcia opposto vietato) o del trasporto pubblico	L/M	H/M
Facilità di realizzare disassamento della carreggiata per limitare le velocità e/o coordinamento semaforico dell'itinerario	L	H
Legenda: H = effetto di alta intensità M = effetto di media intensità L = effetto di scarsa intensità 0 = effetto inesistente		

Tabella 10

Aspetti da considerare nella scelta fra divieto di manovra e divieto di accesso e relativa intensità in ciascun provvedimento

Possibile utilizzazione	PRO	CONTRO
<u>A favore dei pedoni</u> (allargamento marciapiedi e/o arredo urbano)	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento sicurezza pedoni • Aumento vivibilità strada • Rivitalizzazione commerciale 	
<u>A favore del trasporto pubblico</u> (TP) di superficie (corsia preferenziale in senso opposto)	<ul style="list-style-type: none"> • Ripristino accessibilità al TP precedente al senso unico • Miglioramento deflusso TP 	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione efficienza nell'uso dello spazio stradale [1]
<u>A favore della sosta</u> (disposizione di stalli di sosta lungo la carreggiata)	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento dell'offerta di sosta 	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione velocità media • Riduzione capacità [2]
<u>A favore del traffico veicolare</u> nel senso di marcia consentito (corsia aggiuntiva)	<ul style="list-style-type: none"> • aumento capacità stradale • Aumento affidabilità stradale 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento velocità massime [3]
[1] In presenza di un numero scarso di corsie del TP. [2] Da considerare solo se scende al di sotto della capacità dell'accesso della stessa strada all'intersezione a valle. [3] In presenza di 2 o più corsie nello stesso senso di marcia ed in assenza di dispositivi atti ad impedire il sorpasso.		

Tabella 11

Vantaggi e svantaggi delle possibili utilizzazioni dello spazio reso disponibile dall'imposizione del senso unico di marcia

Caratteristiche	Provvedimento nell'intersezione	
	Divieto di manovra	Divieto di accesso (senso unico)
<i>Efficacia</i> (rispetto all'obiettivo di migliorare il funzionamento delle intersezioni)	M	H
<i>Flessibilità</i> (possibilità di dosare l'intervento nel modo e nella quantità desiderati)	M	L
<i>Selettività</i> (possibilità di intervenire solo sui flussi di manovra scelti)	H	M
<i>Semplicità ed economicità di attuazione</i>	H	M
<i>Semplicità ed economicità dei sistemi di controllo</i>	M/L	H
<i>Autocontenimento</i> (limitazione del trasferimento dei problemi altrove)	H/M	M/L
H = Caratteristica di alta intensità M = caratt. di media intensità L = caratt. di scarsa intensità		

Tabella 12
Divieto di manovra e divieto di accesso: caratteristiche a confronto

A5.7 ALCUNI ELEMENTI RIGUARDANTI I MODELLI DI SIMULAZIONE DEL TRAFFICO

Una volta definite le caratteristiche della rete stradale e degli archi che la costituiscono, sia dal punto di vista delle componenti fisiche che organizzative, occorre definire metodi quantitativi che formalizzino l'interazione tra le componenti fondamentali di un sistema di trasporto, la domanda e l'offerta di mobilità. La formalizzazione logico-matematica di tali relazioni risulta di particolare interesse sia in fase di pianificazione di sistemi di trasporto che in fase di progettazione degli elementi del sistema stesso. Nella letteratura sono state proposte diverse strutture modellistiche, più o meno complesse ed in questo paragrafo vengono presentati, anche se in modo non esaustivo, alcuni elementi dei modelli d'interazione domanda-offerta (modelli di assegnazione), per fornire un quadro informativo generale sui principi di base e sulle ipotesi su cui essi si fondano, tenendo in considerazione il sistema delle attività presenti.

La domanda di mobilità nasce dall'interazione tra le diverse componenti del sistema di attività (localizzazione e tipologia delle famiglie, livello e localizzazione delle attività economiche, tipologia e quantità di superfici, ecc.) presenti su un territorio. Essa è il risultato dell'azione dell'assetto del territorio sul particolare sistema di offerta di trasporto presente, e rappresenta l'aggregazione degli spostamenti necessari per utilizzare i servizi presenti sul territorio, in luoghi diversi dalla residenza, utilizzando uno o più mezzi o modi di trasporto e nel periodo di tempo di riferimento. Va soltanto ricordato che lo spostamento non produce "utilità" o "soddisfazione" in sé ma è piuttosto complementare all'utilizzo di tali servizi.

Poiché lo studio e la progettazione delle infrastrutture e dei servizi di trasporto nascono proprio per soddisfare i bisogni di mobilità del sistema delle attività, occorrerebbe che questo sia rappresentato con il maggior numero di elementi possibili per ciascun sottosistema:

- le residenze ovvero le famiglie che risiedono in ciascuna zona articolate per categorie (definite da fascia di reddito, ciclo di vita, composizione ecc.);
- le attività economiche localizzate in ciascuna zona articolate per settore (diversi comparti dell'industria, dei servizi alle imprese, dei servizi alle famiglie ecc.) e



- Rodella, D. (1996) Leggi urbanistiche. Decreti e istruzioni ministeriali. Provvedimenti vari, Milano, Il Sole 24 Ore
- Salvia, F. (2012) Manuale di diritto urbanistico, Padova, Cedam
- Sandulli, A.M. (1990) Scritti giuridici. Diritto urbanistico, Napoli, Jovene
- Spantigati, F. (1990) Diritto urbanistico, Padova, Cedam
- Spantigati, F. (1969) Manuale di diritto urbanistico, Milano, Giuffrè
- Stella Richter, P. (2012) Diritto urbanistico. Manuale breve, Milano, Giuffrè
- Tiboni, M. (2004) Pianificazione urbanistica e sicurezza stradale, Cosenza, Bios
- Tira, M. (2005) "La progettazione della mobilità nel territorio urbano: soluzioni e loro effetti sulla popolazione", in AA.VV., L'integrazione delle politiche sanitarie e di pianificazione territoriale per uno sviluppo sostenibile, Modena, Agende XXI locali italiane
- Tira, M. (1997) Pianificare la città sicura, Roma, Dedalo
- Tira, M. (1997) "Piani urbani per il traffico. Sicurezza negli attraversamenti pedonali", in Atti del Seminario di aggiornamento "Le problematiche tecnico-legislative inerenti l'abbattimento delle barriere architettoniche e la progettazione accessibile" (Treviso, 1997), Treviso, Provincia di Treviso
- P. Urbani et al. (2013) Diritto urbanistico. Organizzazione e rapporti. Torino, Giappichelli

Riferimenti per il capitolo A3

- Cappelli A., D'Armini R. (1985) "Sistemi di trasporto passeggeri non convenzionali ed innovativi", Nuovi Trasporti n.3 (pp. 155-179)
- Dalla Chiara B., Degioanni P., Fumarola F.P. (01/2008), "Riepilogo di sistemi di trasporto innovativi", Ingegneria Ferroviaria
- De Falco F. (07-08/1974) "Fattibilità reale di nuovi sistemi di trasporto urbano", Ingegneria Ferroviaria
- Fabian L.J. (03/1999) "The world market for automated people movers", Janès
- Ricci S. (03/2011): Tecnica ed Economia dei Trasporti, Hoepli Editore
- Richards B. (1969), "Città futura e traffico urbano", Marsilio Editore, Padova
- Transportation Research Board (TRB) (2004): Transit Capacity and Quality of Service Manual [TCRP]. Washington, D.C., U.S.A
- Transportation Research Board (TRB) (2010): Highway Capacity Manual. Washington, D.C., U.S.A
- Vuchic V.R. (2007) "Urban Transit Systems and Technology", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey
- www.bombardier.com/en/transportation.html
- www.brooklineconnection.com
- www.brтчicago.com
- www.funivie.org
- www.mobilicites.com
- www.ropeways.eu
- www.personalrapidtransit.com
- www.railway-technology.com
- www.theamericanmonorailproject.com
- <http://transportation.wvu.edu/prt>

Riferimenti per il capitolo A4

- Busi, R., Zavanella L. (a cura di) (2002), Tecniche per la sicurezza stradale in ambito urbano, Volume VI La classificazione funzionale delle strade, Forlì, EGAF edizioni srl
- Busi, R., Zavanella L. (a cura di) (2003), Tecniche per la sicurezza stradale in ambito urbano, Volume III Le normative europee per la moderazione del traffico, Forlì, EGAF edizioni srl
- Maternini G., Foini S. (2004), Cantieri stradali e ambiente. In: Le Strade, ottobre 2004. La Fiaccola editrice srl, Milano
- Maternini G. (a cura di) (2004), Tecniche per la sicurezza stradale in ambito urbano, Volume IV Regolamento ambientale per i cantieri stradali, Forlì, EGAF edizioni srl

Riferimenti per il capitolo A5

- Cappelli A., Luongo A.S., Mallano D., Petrucci U. (2000), Strumenti e metodologie per la gestione del sistema stradale urbano, Franco Angeli, Milano
- Cascetta E. Nuzzolo A. Coppola P. (2006) "Territorio, Economia, Logistica e Trasporti", Ed. TEXMAT, Roma
- Cascetta E. (1998) "Teoria e Metodi dell'Ingegneria dei Sistemi di Trasporto" Ed. UTET, Torino
- Chakroborty P. (2006), Models of vehicular traffic: An engineering perspective, Physica A n. 372 ppgg.151-161, www.elsevier.com/locate/physa
- CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche (1992), Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane, Boll. Uff. C.N.R., n°150





BIBLIOGRAFIA

- Colin Buchanan (1963) *Traffic in Towns - A Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas - Reports of the Steering Group and Working Group appointed by the Minister of Transport*. London: HMSO
- Distefano N., Leonardi S. (2005), *La capacità ambientale come indicatore di qualità delle infrastrutture stradali*. Riv. Qualità - ED. AICQ (Associazione Italiana Cultura Qualità). N° 5 - Giugno/Luglio (<http://www.stradelandia.it/pubdown/65.pdf>)
- Ossen S., Hoogendoorn S. P. (2011), *Heterogeneity in car-following behavior: Theory and empirics*, *Transportation Research Part C* 19 p. 182-195
- TRB - Transportation Research Board (2000), *Highway capacity manual*, Washington

Riferimenti per il capitolo A6

- Transportation Research Board of the National Academies (TRB) (2010), *HCM 2010 - Highway Capacity Manual*, Washington DC

Riferimenti per il capitolo A7

- Buchanan C. et al. (1963) *Traffic in towns*, London HMSO
- Busi R. e Zavanella L. (a cura di) (2002) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. II *La classificazione funzionale delle strade*, Egaf Edizioni, Forlì
- Busi R. e Zavanella L. (a cura di) (2003) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. III *Le normative europee per la moderazione del traffico*, Egaf Edizioni, Forlì
- Ewing R. (1999) *Traffic calming - State of the practice*. ITE, Washington
- Kjemtrup K., Herrstedt L., (1992) *Speed management and traffic calming in urban areas in Europe: a historical view, in Accident analysis and prevention*, Vol.24, N.1, p.57-65, Pergamon Press, Great Britain
- Maternini G., Foini S. (a cura di) (2005) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. VII *Elementi per la redazione del regolamento viario*, Egaf Edizioni, Forlì
- Maternini G., Foini S. (a cura di) (2007) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. IX *Interventi per incentivare la mobilità non motorizzata*, Egaf Edizioni, Forlì
- Maternini G., Foini S. (a cura di) (2010) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. XIV *Tecniche di moderazione del traffico - Linee guida per l'applicazione in Italia*, Egaf Edizioni, Forlì
- Maternini G., Pezzagno M. (2012) *Metodi di pianificazione partecipata: il caso di studio del Villaggio Violino in Brescia*. In: Steffan I. (a cura di) *Design for All - Il Progetto per Tutti*. Maggioli Editore, Roma
- Ministero dei Lavori Pubblici, *Direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei Piani urbani del traffico - DM 12/4/1995*. SOGU n. 146 del 24/6/1995
- Muhlrad N. (2000), *A Short History of Physical Speed Reduction Measures in European Urban Areas*. Proceedings of ICTCT Workshop on Traffic Calming, Delhi
- Newman P., Renworthy J. (1999), *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Island Press, Washington
- Pucher J., Clore S., (1992) *Taming the automobile in Germany*, *Transportation Quarterly*, Vol.46
- Tiboni M. (2010) *Storia della moderazione del traffico in Europa e sue implicazioni urbanistiche*. In Maternini G., Foini S. (a cura di) (2010) *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. XIV *Tecniche di moderazione del traffico - Linee guida per l'applicazione in Italia*, Egaf Edizioni, Forlì
- Tolley R., (1990) *Calming traffic in residential areas*, Brefi Press, Brefi England
- Vis A. A., Dijkstra A., Slop M. (1992) *Safety effects of 30 km/h zones in The Netherlands*. In: SWOV (Institute of Road Safety Research), *Accident analysis and prevention*
- Vis A. A., Keal I. (1992) *The safety of 30 km/h zones only Dutch*. In: SWOV (Institute of Road Safety Research), *Accident analysis and prevention*
- Normativa svedese:
- The Swedish National Board of Urban Planning and the National Road Administration, *The SCAFT Guidelines*, Karishamn, Sweden, 1968
- Normativa tedesca:
 - EAHV93; EAE85/96: RAS 06
- Normativa svizzera:
 - VSS, SN 640 280-285; VSS, SN 640 212-213 (*Moderation du trafic*, 1996)
- Normativa francese:
 - CERTU, *Guide à la "Zone 30" - Méthodologies et recommandations*, 1990
 - CERTU, *Savoir faire et techniques*, 1990
 - *Nuovo codice della strada francese (Novità introdotte dal D. lgs 754 del 2008)*
 - CERTU, *"Les zones de circulation particulières en milieu urbain"* Novembre 2008
 - CERTU, *"Zones de circulation apaisée"*, n.1-2-3, Novembre 2008- agosto 2009





INDICE

	SOMMARIO	5
	NOTE BIOGRAFICHE	7
	NOTA DELL'EDITORE	10
	PREFAZIONE DEL DIRETTORE DELLA COLLANA	11
	PREMESSA DEL CURATORE DEL VOLUME	13
	INTRODUZIONE DEL COMITATO SCIENTIFICO	15
A	OFFERTA DI TRASPORTO PER LA MOBILITÀ URBANA	
A1	RAPPORTI TRA LA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E TERRITORIALE E L'INGEGNERIA DEI TRASPORTI	29
A1.1	CIVITAS ED URBS: LA CITTÀ DELLA GENTE E LA CITTÀ DELLA PIETRA	29
A1.2	AMBIENTE URBANO E MOBILITÀ	32
A1.3	L'UTENTE DEBOLE SI MUOVE NELLA CITTÀ	37
A1.4	LA CATENA MODALE DELLA MOBILITÀ	38
A1.5	CITTÀ E DIPENDENZA DALL'AUTOMOBILE	42
A2	URBANISTICA E MOBILITÀ: INTEGRAZIONE NELLA PIANIFICAZIONE	45
A2.1	PIANIFICAZIONE URBANISTICA: RIFERIMENTI NORMATIVI	45
A2.2	PIANIFICAZIONE DELLA MOBILITÀ: RIFERIMENTI NORMATIVI	48
A2.3	INTEGRAZIONE DISCIPLINARE	50
A3	CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTI TRADIZIONALI, NON CONVENZIONALI ED INNOVATIVI	53
A3.1	DEFINIZIONE CLASSICA: SISTEMI A DENSITÀ LIBERA E CONTROLLATA	53
A3.1.1	Densità Libera	54
A3.1.2	Densità Controllata	56
A3.1.3	Definizioni, prestazioni e capacità di trasporto dei sistemi tradizionali	59
A3.2	I TRASPORTI E LA STRUTTURA URBANA	61
A3.3	UNA "DEFINIZIONE DI SISTEMA"	63
A3.4	ALCUNI ESEMPI DI SISTEMI NON CONVENZIONALI E INNOVATIVI SECONDO LA DEFINIZIONE PROPOSTA	64
A3.5	CENTRI STORICI	65
A3.6	ZONE DI NUOVA ESPANSIONE ED AREE CONSOLIDATE	67
A4	CLASSIFICAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE STRADALI	71
A4.1	CLASSIFICAZIONI DELLE STRADE	71
A4.2	CLASSIFICAZIONE FUNZIONALE DELLE STRADE	72
A4.2.1	Classificazione funzionale delle strade urbane ed extraurbane	73
A4.2.2	Azzonamento urbanistico	73
A4.2.3	Azzonamento acustico	74
A4.3	CLASSIFICAZIONE DELLE STRADE IN ALCUNI PAESI EUROPEI	75
A4.3.1	La normativa danese	75
A4.3.2	La normative svedese	77
A4.3.3	La normative olandese	77





INDICE

A4.4	CLASSIFICAZIONE DELLE STRADE IN ESERCIZIO IN BASE ALLA VELOCITÀ OPERATIVA DEI VEICOLI _____	78
A4.5	"CLASSIFICAZIONE AMBIENTALE" DELLE STRADE _____	80
A4.5.1	Le strade urbane _____	81
A4.5.2	Le strade extraurbane _____	83
A4.6	PROCEDURA A BLOCCHI PER LA CLASSIFICAZIONE _____	84
A4.7	CONCLUSIONI _____	85
A5	ELEMENTI DI INGEGNERIA DEL TRAFFICO _____	87
A5.1	IL SISTEMA STRADALE URBANO E LA CAPACITÀ _____	87
A5.2	CAPACITÀ FISICA E CAPACITÀ AMBIENTALE _____	88
A5.3	CAPACITÀ DELLA RETE _____	92
A5.4	REGOLAZIONE DELLE INTERSEZIONI _____	96
A5.5	EFFETTI DELLA MODERAZIONE DEL TRAFFICO SULLA CAPACITÀ DELLE STRADE _____	103
A5.6	REGOLAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE _____	110
A5.7	ALCUNI ELEMENTI RIGUARDANTI I MODELLI DI SIMULAZIONE DEL TRAFFICO _____	117
A6	DETERMINAZIONE DEI LIVELLI DI SERVIZIO IN AREA URBANA _____	123
A6.1	LIVELLO DI SERVIZIO VEICOLARE _____	123
A6.1.1	Intersezioni semaforizzate _____	124
A6.1.2	Rotatorie _____	132
A6.1.3	Ambiti per interventi migliorativi _____	137
A6.2	LIVELLO DI SERVIZIO PEDONALE _____	137
A6.2.1	Introduzione _____	137
A6.2.2	Determinazione del LOS pedonale di un arco di strada urbana (tratto dal cap. 17 HCM 2010) _____	139
A6.2.3	Determinazione del LOS pedonale di un arco stradale dedicato alla circolazione di utenze non motorizzate _____	152
A6.2.4	Alcune considerazioni finali sulla nuova metodologia di calcolo del LOS pedonale introdotta dall'HCM 2010 _____	155
A6.3	LIVELLO DI SERVIZIO CICLISTICO _____	156
A6.3.1	Introduzione _____	156
A6.3.2	Determinazione del LOS ciclistico lungo un segmento di strada urbana _____	157
A7	TECNICHE DI MODERAZIONE DEL TRAFFICO _____	171
A7.1	NASCITA ED EVOLUZIONE DELLA MODERAZIONE DEL TRAFFICO _____	171
A7.1.1	La moderazione del traffico nelle zone residenziali _____	172
A7.1.2	La moderazione del traffico nei centri storici _____	173
A7.1.3	La moderazione del traffico a vasta scala _____	174
A7.2	ELEMENTI PER L'APPLICAZIONE DELLA MODERAZIONE DEL TRAFFICO IN ITALIA _____	174
A7.2.1	Le "Zone 30" _____	178
A7.2.2	Le Zone residenziali _____	179
A7.2.3	Elementi rallentatori di velocità _____	180
A7.3	DIMENSIONAMENTO DI ALCUNI ELEMENTI DI MODERAZIONE DEL TRAFFICO _____	180
A7.3.1	Normativa olandese _____	181
A7.3.2	Normativa tedesca _____	185



A7.3.3	Normativa svizzera _____	191
A7.3.4	Normativa danese _____	194
A7.4	DIFFICOLTÀ NELLA DIFFUSIONE DELLE TECNICHE DI MODERAZIONE DEL TRAFFICO _____	195
A8	RETI DI TRASPORTO E ASSETTO DEL TERRITORIO _____	197
A8.1	INTERAZIONI TRASPORTI - TERRITORIO _____	197
A8.1.1	Nascita e crescita delle città _____	197
A8.1.2	Analisi delle interazioni territorio - trasporti _____	200
A8.1.3	Aspetti del sistema trasporti territorio _____	203
A8.2	COMPONENTI E CARATTERISTICHE DEI SISTEMI DI TRASPORTO PUBBLICO LOCALE _____	206
A8.2.1	Componenti dei sistemi di trasporto pubblico locale _____	206
A8.2.2	Caratteristiche essenziali dei sistemi di trasporto pubblico locale _____	208
A8.3	CLASSIFICHE DEI SISTEMI DI TPL _____	216
A8.4	SISTEMI SU GOMMA A GUIDA LIBERA, O SEMIVINCOLATA (AUTOBUS E FILOBUS) _____	219
A8.4.1	Gli autobus _____	219
A8.4.2	I filobus _____	222
A8.5	SISTEMI INTERMEDI _____	225
A8.5.1	Sistemi a guida meccanica _____	225
A8.5.2	Sistemi a guida ottica _____	227
A8.5.3	Sistemi a guida magnetica _____	228
A8.6	SISTEMI SU FERRO _____	229
A8.6.1	La tranvia _____	231
A8.6.2	La metrotranvia _____	233
A8.6.3	La metropolitana leggera _____	234
A8.6.4	La metropolitana pesante _____	235
A8.6.5	Le ferrovie regionali _____	237
A8.6.6	Il Tram - treno _____	239
A8.6.7	Altri sistemi a guida vincolata _____	239
A8.7	SISTEMI CON MOTORE DI TRAZIONE A TERRA _____	242
A8.7.1	Funicolari _____	242
A8.7.2	Le funivie _____	245
A8.7.3	Ascensori e percorsi meccanizzati _____	245
A8.7.4	Sistemi di trasporto con infrastrutture mobili _____	246
A8.8	CONCLUSIONI _____	246
A9	VULNERABILITÀ DELLE RETI STRADALI _____	249
A9.1	INTRODUZIONE _____	249
A9.2	EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI VULNERABILITÀ _____	250
A9.3	COMPONENTI DELLA VULNERABILITÀ _____	255
A9.4	VULNERABILITÀ E GESTIONE DELLE EMERGENZE _____	258
A10	STRUMENTI PER LA RACCOLTA DEI DATI DI TRAFFICO _____	261
A10.1	MONITORAGGIO DEI FLUSSI VEICOLARI STRADALI E RACCOLTA DATI SUI VEICOLI _____	262
A10.2	STRUMENTI DISPOSTI SULL'INFRASTRUTTURA DI TIPO INTRUSIVO _____	263
A10.2.1	Tubi conta-macchine (pneumatici) _____	264
A10.2.2	Spire induttive _____	264
A10.2.3	Magnetometri _____	265



INDICE

A10.2.4	Piezo-elettrici _____	266
A10.3	STRUMENTI DISPOSTI SULL'INFRASTRUTTURA DI TIPO NON INTRUSIVO _____	266
A10.3.1	Microonde, infrarossi ed ultrasuoni _____	267
A10.3.2	Acustici passivi _____	270
A10.3.3	Video rilevamento _____	270
A10.4	RETI DI SENSORI SENZA FILI _____	271
A10.5	RACCOLTA DATI DI TRAFFICO MEDIANTE VEICOLI SONDA _____	272
A10.6	ALCUNE CONSIDERAZIONI SUGLI STRUMENTI PER LA RACCOLTA DEI DATI DI TRAFFICO VEICOLARE _____	272
A10.7	STRUMENTI AUTOMATICI PER IL RILIEVO DEI FLUSSI DI TRAFFICO NON MOTORIZZATO _____	273
A10.7.1	Circuiti magnetici _____	274
A10.7.2	Sensore Piroelettrico o ad infrarosso _____	274
A10.7.3	Sensori acustici o ad ultrasuoni e strumentazioni radar _____	275
A10.7.4	Visione artificiale _____	276
A10.7.5	Tubi pneumatici _____	277
A10.8	TECNICHE DI INDAGINE SULLA SOSTA _____	278
A10.8.1	Rappresentazione dell'offerta di sosta _____	278
A10.8.2	Caratterizzazione della domanda _____	278
A10.8.3	Tecniche di rilevamento _____	279
B	INTERAZIONI TRA SISTEMI DI TRASPORTO E CITTÀ	
B1	CLASSIFICAZIONE DELLE ESTERNALITÀ NEI TRASPORTI _____	283
B1.1	DEFINIZIONE _____	283
B1.2	FONTI DI RIFERIMENTO E METODI DI STIMA MONETARIA DELLE ESTERNALITÀ _____	285
B1.2.1	ExternE - Externalities of Energy Methodology 2005 _____	285
B1.2.2	INFRAS 2004 _____	286
B1.2.3	UIC: External Costs of Transport in Europe - Delft, September 2011 (CE Delft, INFRAS, Fraunhofer ISI _____	286
B1.3	CAMPO DI APPLICAZIONE DELLE STIME DELLE ESTERNALITÀ _____	290
B2	ACCESSIBILITÀ E LOCALIZZAZIONE DELLE ATTIVITÀ NELLE AREE URBANE _____	291
B2.1	POLITICHE DI MOBILITÀ E LOCALIZZAZIONE DELLE ATTIVITÀ ECONOMICHE _____	291
B2.2	COSTO GENERALIZZATO DI SPOSTAMENTO E LOCALIZZAZIONE DEI RESIDENTI SUL TERRITORIO _____	295
B2.3	L'ACCESSIBILITÀ _____	297
B2.3.1	Indicatori di accessibilità _____	298
B2.4	I MODELLI DI SCELTA DELLA LOCALIZZAZIONE DELLE ATTIVITÀ _____	300
B2.4.1	Localizzazione delle residenze _____	300
B2.4.2	Localizzazione urbana delle attività produttive _____	303
B3	PERIFERIE E CITTÀ: STRUMENTI DI MOBILITÀ PER L'INCLUSIONE SOCIALE _____	305
B3.1	INTRODUZIONE _____	305
B3.2	CARATTERISTICHE DELLE AREE PERIFERICHE DAL PUNTO DI VISTA DELLA MOBILITÀ _____	306



B3.2.1	La rete infrastrutturale all'interno dell'area _____	308
B3.2.2	La rete infrastrutturale e i servizi per il collegamento dell'area periferica con la città _____	309
B3.2.3	I servizi di trasporto offerti ai residenti delle aree periferiche _____	310
B3.2.4	La pedonalità in periferia _____	312
B3.3	INTERFACCIA TRA SERVIZI URBANI E PERIURBANI _____	314
B3.3.1	L'interconnessione delle reti di trasporto e della rete viaria, in termini di gestione dei punti di interscambio e di integrazione tariffaria _____	314
B3.4	DISUGUAGLIANZE E TERRITORIO _____	316
B3.4.1	La crescita diffusa delle città e la segregazione spaziale _____	317
B3.4.2	Gli aspetti territoriali negli insediamenti urbani e le conseguenti disuguaglianze _____	319
B3.5	INTERVENTI INFRASTRUTTURALI E DI SERVIZI NELLE AREE PERIFERICHE _____	320
B3.5.1	Complementarità dei modi _____	320
B3.5.2	Le esigenze di collegamenti periferia - resto della città _____	321
B3.5.3	Servizi a chiamata _____	322
B3.5.4	Criteri di management per i servizi a favore dei quartieri periferici _____	322
B3.6	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE _____	323
B4	SISTEMI DI TRASPORTO E PLUSVALENZA DELLE AREE _____	325
B4.1	PREMESSA _____	325
B4.2	STRATEGIE DI ACQUISIZIONE DELLE AREE PER LE INFRASTRUTTURE: DALL'ESPROPRIAZIONE PER PUBBLICA UTILITÀ ALLA PEREQUAZIONE URBANISTICA COMPENSATIVA _____	327
B4.2.1	Fondamenti concettuali della perequazione urbanistica compensativa _____	327
B4.2.2	Metodologie estimative funzionali alla perequazione compensativa _____	332
B4.3	STRATEGIE DI ATTIVAZIONE DI RISORSE PUBBLICHE FUNZIONALI AL CO-FINANZIAMENTO DELLE INFRASTRUTTURE: IMPOSTA DI SCOPO SUGLI IMMOBILI DELLA ZONA BENEFICIATA _____	336
B4.3.1	Istituzione e caratteristiche dell'imposta di scopo _____	336
B4.3.2	Implicazioni estimative e valutative dell'imposta di scopo _____	340
B4.3.3	Prospettive evolutive nella "cattura di valore" applicata alla fiscalità immobiliare _____	342
B4.4	STRATEGIE DI ATTRAZIONE DI FINANZIAMENTI PRIVATI FUNZIONALI AL CO-FINANZIAMENTO DELLE INFRASTRUTTURE: BENI E SERVIZI CONNESSI AL PROGETTO PER CO-FINANZIARE L'OPERA _____	343
B4.4.1	Partenariato pubblico privato per la realizzazione di infrastrutture _____	343
B4.4.2	Metodologie di valutazione delle risorse ritraibili dal partenariato pubblico privato _____	348
B4.5	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE _____	349



INDICE

B5	INCIDENTALITÀ STRADALE	351
B5.1	METODI DI ANALISI DELLA SICUREZZA STRADALE _____	351
B5.1.1	I dati a disposizione per le analisi della sicurezza stradale _____	351
B5.1.2	Analisi di sicurezza correttive, preventive e predittive _____	351
B5.2	TASSO DI INCIDENTALITÀ PER CLASSE FUNZIONALE DELLE STRADE _____	353
B5.3	L'ANALISI "CLINICA" DELL'INCIDENTALITÀ STRADALE: DALLA LOCALIZZAZIONE CARTOGRAFICA AGLI SCENARI DI INCIDENTE _____	359
B5.3.1	I metodi di analisi dell'incidentalità stradale _____	359
B5.3.2	La dimensione spaziale degli incidenti _____	366
B5.3.3	Definizione di scenario di incidente ed esempi di scenari per l'utenza debole _____	367
B5.3.4	La rappresentazione cartografica degli incidenti classificati per scenario tipo _____	369
B5.3.5	Un metodo speditivo per la classificazione degli incidenti per scenario _____	369
C	SOSTENIBILITÀ NELLA PIANIFICAZIONE DEI TRASPORTI	
C1	PIANIFICAZIONE DEI TRASPORTI PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE	377
C1.1	INTRODUZIONE _____	377
C1.2	SITUAZIONE ATTUALE DEL SETTORE DEI TRASPORTI _____	378
C1.2.1	Aspetti sociali _____	380
C1.2.2	Aspetti economici _____	380
C1.2.3	Aspetti ambientali _____	380
C1.3	LO SVILUPPO SOSTENIBILE E LA MOBILITÀ SOSTENIBILE _____	381
C2	APPROCCI E STRUMENTI PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE	385
C2.1	STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE _____	387
C2.1.1	Pianificazione territoriale _____	387
C2.1.2	Pianificazione dei trasporti _____	400
C2.1.3	Trasporto Pubblico _____	402
C2.1.4	Modi di trasporto non motorizzati _____	403
C2.1.5	Usi alternativi dell'auto _____	407
C2.2	STRUMENTI DI REGOLAZIONE _____	408
C2.2.1	Gestione della sosta _____	408
C2.2.2	Limitazione della circolazione _____	409
C2.2.3	Traffic calming _____	409
C2.2.4	Limitazione della velocità _____	412
C2.3	STRUMENTI ECONOMICI _____	414
C2.3.1	Road Pricing _____	414
C2.3.2	Alcuni casi studio sull'applicazione del road pricing _____	415
C2.3.3	Parking Pricing _____	416
C2.3.4	Carbon Tax _____	416
C2.3.5	Integrazione tariffaria _____	417
C2.3.6	Assicurazione Pay As You Drive _____	417
C2.4	STRUMENTI DI INFORMAZIONE _____	418
C2.4.1	Sensibilizzazione dell'opinione pubblica _____	418
C2.4.2	Mobility management _____	418



C2.4.3	Infomobilità _____	418
C2.5	STRUMENTI TECNOLOGICI _____	419
C2.5.1	Miglioramento dell'efficienza dei veicoli _____	419
C2.5.2	Uso di combustibili e vettori energetici puliti _____	421
C2.5.3	Introduzione di sistemi tecnologici _____	422
C2.6	STRUMENTI INDUSTRIALI: VEICOLI ELETTRICI, IBRIDI, RICARICHE _____	424
C2.6.1	Cenni sui veicoli ibridi ed elettrici _____	424
C2.6.2	Veicoli elettrici _____	424
C2.6.3	Veicoli ibridi (HEV- Hybrid Electric Vehicle) _____	426
C2.6.4	Ibridi PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) _____	427
C2.6.5	Cenni sulla ricarica dei veicoli elettrici ed ibridi _____	428
C2.6.6	La ricarica conduttiva _____	428
C2.6.7	Ricarica induttiva _____	431
C2.6.8	Scatola nera _____	433
C3	VERSO UN NUOVO MODELLO DI PIANIFICAZIONE DEI TRASPORTI _____	435
C3.1	LIMITI DELLA PIANIFICAZIONE TRADIZIONALE _____	435
C3.2	PIANIFICARE PER L'ACCESSIBILITÀ _____	436
C3.3	IL PROCESSO DI PIANIFICAZIONE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE _____	444
C3.3.1	Best practice _____	446
C3.3.2	Analisi di scenario _____	447
C3.3.3	Strumenti modellistici di supporto al processo di pianificazione _____	447
C3.3.4	Monitoraggio del piano di mobilità sostenibile _____	448
C3.3.5	La partecipazione pubblica nella pianificazione dei trasporti _____	449
C3.3.6	Conclusioni sul ruolo della mobilità sostenibile nella pianificazione dei trasporti _____	450
C4	INTEGRAZIONE TRA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E DEI TRASPORTI. NUOVI ORIENTAMENTI PER IL PROGETTO DELLA CITTÀ SOSTENIBILE _____	453
C4.1	INTEGRAZIONE TRA PIANIFICAZIONE URBANISTICA E DEI TRASPORTI PER LA CITTÀ SOSTENIBILE _____	453
C4.2	IL CASO STUDIO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO DELLA CITTÀ DI CATANIA _____	457
C4.2.1	La costruzione di un nuovo modello urbano e il ruolo del trasporto su ferro _____	461
C4.3	ACCESSIBILITÀ INTEGRAZIONE E SOSTENIBILITÀ. PROPOSTE PER UN MODELLO PROGETTUALE _____	467
C5	INDICATORI PER CARATTERIZZARE LA SOSTENIBILITÀ DI POLITICHE DI MOBILITÀ _____	473
C5.1	INTRODUZIONE _____	473
C5.1.1	Analisi della letteratura _____	474
C5.2	INDIVIDUAZIONE E CLASSIFICAZIONE DI MACRO-SETTORI DI ANALISI _____	479
C5.3	DEFINIZIONE DI UN SET DI INDICATORI _____	483
C5.4	INDIVIDUAZIONE DI POSSIBILI FONTI DI DATI _____	488
	BIBLIOGRAFIA _____	489

