

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE**

Sede Amministrativa del Dottorato di Ricerca

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Sede Convenzionata

**XX CICLO DEL  
DOTTORATO DI RICERCA IN  
INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE, DELLE STRUTTURE  
E DEI TRASPORTI**

***STRUMENTI PER L'ANALISI DEI SISTEMI DI TRASPORTO  
ALLA SCALA REGIONALE:***

***MODELLI DI SIMULAZIONE E SISTEMI INFORMATIVI***

(Settore scientifico-disciplinare ICAR/05)

*Dottorando*  
**Ing. Riccardo Maratini**

*Coordinatore del Collegio dei Docenti*  
**Chiar. mo Prof. Ing. Roberto Camus**  
Università degli Studi di Trieste

Firma \_\_\_\_\_

*Tutore*  
**Chiar. mo Prof. Ing. Riccardo Rossi**  
Università degli Studi di Padova

Firma \_\_\_\_\_

*Relatore*  
**Chiar. mo Prof. Ing. Romeo Vescovi**  
Università degli Studi di Padova

Firma \_\_\_\_\_

*Correlatore*  
**Ing. Armando Caprini**

Firma \_\_\_\_\_

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
---------------------------	----------

<b>PARTE 1: MODELLI DI SIMULAZIONE PER L'ANALISI DELL'OFFERTA DEL SISTEMA DI TRASPORTO ALLA SCALA REGIONALE .....</b>	<b>9</b>
---	----------

<i>1 ANALISI E RAPPRESENTAZIONE DELL'OFFERTA DI TRASPORTO PRIVATO .....</i>	<i>10</i>
1.1 La modellizzazione della rete stradale: criteri ed effetti nella scelta della schematizzazione .....	11
1.1.1 La rappresentazione dell'area di studio (zonizzazione) .....	11
1.1.2 Descrizione della topologia della rete .....	13
1.1.3 Valutazione prestazionale degli archi della rete .....	13
1.2 La specificazione della forma funzionale delle funzioni di costo: rassegna delle tipologie presenti in letteratura .....	23
1.2.1 Funzioni di costo per condizioni di flusso ininterrotto.....	24
1.2.2 Funzioni di costo per condizioni di flusso interrotto.....	42
1.2.3 La modellizzazione delle condizioni di sovrasaturazione .....	46
1.2.4 Un approccio generale alla modellizzazione del perditempo: la funzione di Akçelik .....	49
1.2.5 Modellizzazione di condizioni eterogenee di deflusso.....	52
1.3 La descrizione delle condizioni del deflusso veicolare ai fini della valutazione prestazionale.....	59

<b>PARTE 2: SISTEMI INFORMATIVI PER L'ANALISI DEI SISTEMI DI TRASPORTO .....</b>	<b>62</b>
--	-----------

<i>2 I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI NELL'ANALISI SPAZIALE E DI RETE.....</i>	<i>63</i>
2.1 DBMS: Caratteristiche e funzionalità.....	64
2.1.1 Definizione e vantaggi di un DBMS .....	64
2.1.2 Il modello relazionale .....	67
2.1.3 Le basi di dati a oggetti.....	71

2.1.4	Le funzionalità (avanzate) di un moderno DBMS.....	74
2.1.5	Rassegna storica dei software DBMS .....	78
2.2	DBMS spaziali e GIS.....	79
2.2.1	Basi di dati spaziali.....	79
2.2.2	Oracle Spatial .....	90
2.2.3	Sistemi Informativi Geografici .....	91
2.3	Il modello di rete nella rappresentazione delle relazioni spaziali.....	99
2.3.1	Il modello di rete di Oracle.....	101
2.4	Instaurazione di corrispondenze mediante algoritmi spaziali e di rete: network matching e map matching.....	104
2.4.1	Algoritmi di network matching .....	104
2.4.2	Algoritmi di map matching per applicazioni tradizionali ed innovative (ITS) 106	
3	<i>MODELLI DI DATI E FONTI INFORMATIVE PER LA RAPPRESENTAZIONE DELL'OFFERTA DI TRASPORTO.....</i>	<i>112</i>
3.1	L'utilizzo dei sistemi informativi per la modellizzazione dell'offerta di trasporto privato.....	113
3.1.1	Geographic Data Files (GDF).....	113
3.1.2	Schematizzazione della rete viaria a partire da una rete gerarchica commerciale.....	115
3.2	Modelli di dati standard per il trasporto pubblico .....	118

**PARTE 3: IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA INFORMATIVO A  
SUPPORTO DELLA MODELLIZZAZIONE DELLA DOMANDA E OFFERTA  
DI TRASPORTO..... 125**

4	<i>IMPLEMENTAZIONE DELLA BASE DATI E MODELLIZZAZIONE DELLA RETE DI TRASPORTO DELLA PROVINCIA DI VENEZIA .....</i>	<i>126</i>
4.1	Strutturazione della base dati.....	127
4.2	La componente relativa al sottosistema di trasporto privato .....	127
4.2.1	Le procedure per il popolamento delle tabelle e l'interazione con la base dati 130	

4.3	La componente relativa al sottosistema di trasporto pubblico.....	136
5	<i>CALIBRAZIONE E ATTRIBUZIONE DELLE FUNZIONI DI COSTO</i> .....	140
5.1	Suddivisione degli archi della rete in gruppi funzionalmente omogenei ..	141
5.2	Metodologie di rilevazione e calibrazione dei parametri delle funzioni di costo.....	144
5.2.1	Calibrazioni effettuate a partire da rilievi su tratta .....	144
5.2.2	Calibrazioni effettuate a partire da rilievi puntuali su sezione .....	151
	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>158</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA PARTE I</b> .....	<b>161</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA PARTE 2</b> .....	<b>167</b>

## INTRODUZIONE

L'ingegneria dei trasporti si configura come un'ingegneria di sistema che ha per oggetto l'analisi di elementi collocati spazialmente nel territorio; l'approccio sistemico risulta infatti irrinunciabile viste le caratteristiche di complessità interna dei sistemi di trasporto e la loro stretta interrelazione con il sistema delle attività ed il contesto territoriale. Tali interrelazioni comportano necessariamente un collegamento fra le attività di analisi dei diversi settori. Del resto la crescente sensibilità nei confronti degli impatti risultanti dall'inserimento nel territorio delle infrastrutture di trasporto pone con sempre maggior forza la necessità, nell'analisi del sistema di trasporto, di un approccio caratterizzato da una visione d'insieme e interdisciplinare dei problemi trattati.

In tal senso l'utilizzo dei sistemi informativi territoriali permette di conseguire notevoli vantaggi, permettendo di gestire un insieme complesso di dati con riferimento territoriale e di integrare una molteplicità di procedure in maniera efficiente e flessibile. Nel caso del presente lavoro si è concentrata l'analisi sulle attività che fungono da supporto alle decisioni da parte degli enti della pubblica amministrazione preposti al governo di un territorio di area vasta, come Province o Regioni. In modo specifico la presente attività di ricerca è stata svolta nell'ambito di un accordo di collaborazione scientifica tra il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova e la Provincia di Venezia sul tema della progettazione ed implementazione di un sistema informativo a supporto della pianificazione e del monitoraggio del sistema dei trasporti delle persone, relativamente all'ambito territoriale di interesse provinciale.

Il riferimento a tale caso specifico ha permesso di evidenziare l'influenza della scala a cui si opera, del contesto territoriale e della disponibilità di dati sull'efficacia dell'analisi e quindi sulla scelta delle metodologie da adottare.

A tal proposito occorre ricordare che gli studi condotti finora hanno riguardato principalmente il caso delle aree urbane. Per quanto concerne la mobilità regionale la letteratura esistente offre schemi di analisi piuttosto approssimativi mentre i modelli di simulazione derivano in genere da una estensione dei modelli della mobilità urbana.

Riguardo alla configurazione del sistema insediativo, dal quale dipende l'assetto delle relazioni spaziali, la situazione più semplice è rappresentata da un territorio regionale

con un numero limitato di polarità rilevanti accompagnata da polarità di ordine inferiore e insediamenti rurali a bassa densità insediativa. In tal caso la mobilità regionale risulta essere costituita dai flussi di spostamenti di tipo interurbano e dai flussi fra ogni centro principale e i centri minori situati nel territorio di pertinenza (bacino di influenza). Tale schematizzazione che in passato poteva costituire un riferimento di analisi realistico, non appare oggi sufficientemente rispondente alla realtà, in particolar modo in determinati contesti.

In tal senso risulta particolarmente problematico il caso dell'Area Centrale Veneta, caratterizzata dalla presenza di un'ossatura urbana variamente gerarchizzata, a cui si affiancano fenomeni di urbanizzazione diffusa lungo le principali arterie stradali.

In conseguenza di ciò l'analisi della domanda di mobilità dovrà tener conto di un insieme di relazioni a media e lunga distanza assai complesso ed interconnesso, in cui risulta spesso impossibile individuare aree di influenza ben definite e separabili per le polarità principali rispetto ai centri minori.

Anche la rappresentazione dell'offerta di trasporto viene resa più difficoltosa dal tipo di contesto oggetto di analisi. La sua influenza risulta notevole soprattutto nel caso della viabilità secondaria di aeree extraurbane caratterizzate da una così forte presenza insediativa da potersi definire periurbane.

Infatti in tali situazioni particolarmente forte è l'effetto di elementi esogeni alla rete di trasporto, che in altri casi potrebbero risultare trascurabili (disturbo laterale). Un altro elemento di cui tener conto è inoltre la frammentarietà e disomogeneità della rete (con notevoli ripercussioni non solo sul fenomeno, ma anche sulle metodologie di analisi e rilevazione).

Pertanto le semplificazioni generalmente adottate nella schematizzazione della rete coerenti con il livello di dettaglio dell'analisi alla scala regionale, mentre risultano accettabili nel caso specifico del sistema autostradale, divengono poco realistiche nel caso della rete secondaria nel contesto descritto. Infatti, non sono rari i casi in cui si perviene alla rappresentazione mediante un unico arco di una sequenza di elementi eterogenei, accorpendo spesso elementi caratterizzati da deflusso interrotto con altri contraddistinti da deflusso ininterrotto.

In tale prospettiva appare necessario, specificatamente nella identificazione delle funzioni di costo d'arco, non accettare supinamente modelli ricavati per altre realtà e/o con differenti finalità.

Del resto l'attribuzione delle funzioni di costo al grafo della rete di trasporto privato costituisce una fase di importanza fondamentale nel processo di modellizzazione dell'offerta di trasporto, con ricadute rilevanti sul risultato finale dell'assegnazione dei flussi alla rete. In considerazione di ciò l'analisi effettuata si concentrerà particolarmente su tale aspetto, nell'ambito più generale della descrizione del processo di modellizzazione dell'offerta di trasporto.

Si constata a tal proposito come le forme funzionali presenti in letteratura provengono da approcci in buona parte empirico-induttivi, privi di una modellizzazione del fenomeno basata su di un procedimento rigorosamente deduttivo. Le ragioni di tale lacuna sono molteplici. Innanzitutto la teoria del deflusso non presenta, in generale, i livelli di accuratezza descrittiva riscontrabili in altri campi (fisica meccanica, termodinamica ecc.). Ciò è dovuto alla presenza di caratteristiche di eterogeneità ed aleatorietà difficilmente eliminabili, soprattutto nel caso di rappresentazioni aggregate e di contesti complessi come quella oggetto del presente studio, che rendono problematica la descrizione del fenomeno sulla base di poche grandezze, relativamente alle quali si possa ipotizzare di disporre informazioni per tutti gli elementi della rete.

Infatti in una visione a livello macroscopico del deflusso veicolare tali caratteristiche di eterogeneità (interna alle grandezze utilizzate come variabili esplicative) si traducono in componenti significative di varianza non spiegata. D'altra parte l'assunzione di un tale punto di vista risulta necessaria nell'analisi del sistema di trasporto nel suo complesso, in particolar modo nel caso della modellizzazione a scala regionale.

Inoltre si deve considerare che le funzioni di costo, oltre a rappresentare in maniera realistica le prestazioni dell'arco al variare del flusso, devono rispondere alle esigenze poste dal loro utilizzo negli algoritmi di assegnazione.

Occorre poi tener presente che il livello di tolleranza, spesso piuttosto ampio, è legato a quello più generale presente nel processo di determinazione dei flussi e dei percorsi scelti dagli utenti nella rete. Da un punto di vista pragmatico appare pertanto in molti casi, oltre che gravoso e non sostenibile in termini di requisiti informativi, sostanzialmente inutile spingere l'analisi verso modellizzazioni particolarmente raffinate ed articolate.

Infatti un ulteriore elemento problematico è rappresentato dalla disponibilità di fonti informative da cui attingere i dati da introdurre quali input nei modelli di analisi e simulazione. In generale si riscontra una situazione largamente deficitaria, soprattutto

per quanto riguarda le grandezze di specifico interesse trasportistico. Risulta pertanto necessario impiegare altre fonti di informazione, di carattere generale o comunque disponibili per finalità diverse, per poterne estrarre le informazioni (spesso parziali) di interesse per le analisi di natura trasportistica.

In ogni caso spesso non è possibile disporre dell'insieme dei dati che sono richiesti da modelli interpretativi e di simulazione, più o meno sofisticati, presenti letteratura. Ciò implica la ricerca di soluzioni di compromesso tra il grado di dettaglio proprio del modello rappresentativo del fenomeno reale ed il livello qualitativo e quantitativo dell'informazione richiesta per la sua calibrazione e validazione.

Risulta essenziale nell'ambito di tale procedimento di "economicizzazione" una buona percezione e valutazione dei margini di errore insiti nella modellizzazione stessa; in tal modo sarà possibile capire dove e quando sia necessario accettare l'onere di una raffinazione del modello oppure accontentarsi di strutture più semplici ma compatibili con l'informazione disponibile. In tal senso la conoscenza delle fonti di informazione disponibili (dirette o indirette) e dei sistemi informativi intesi quali strumenti per la gestione dei dati e l'elaborazione delle informazioni diviene essenziale.

Nell'ambito delle problematiche delineate il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di sottolineare le possibilità e problematiche nella rappresentazione dell'offerta di trasporto alla scala regionale mediante l'integrazione di strumenti quali i modelli di simulazione e i sistemi informativi. Il lavoro effettuato, partendo da un'analisi della letteratura, sarà volto a presentare delle metodologie innovative in tal senso.

La trattazione si articolerà in tre parti distinte. Nella prima parte verranno presentati i modelli per la schematizzazione dell'offerta di trasporto, con riferimento al caso del trasporto privato, concentrando la descrizione sul tema delle funzioni di costo.

La seconda parte, invece, sarà volta ad evidenziare le possibilità offerte dai sistemi informativi nella modellizzazione dell'offerta di trasporto.

In modo più specifico, nel terzo capitolo verranno presentate le caratteristiche e potenzialità dei sistemi informativi (con particolare riguardo al caso dei sistemi informativi geografici) nell'analisi di reti come quelle di trasporto; nel quarto capitolo invece si presenteranno le caratteristiche delle fonti dati che possono essere di ausilio in tale analisi, con riferimento a standard internazionali e banche dati disponibili sul mercato.



La terza parte invece è dedicata alla presentazione dei risultati ottenuti dall'applicazione degli strumenti descritti al caso dell'ambito territoriale di interesse della Provincia di Venezia. Nel quarto capitolo verrà infatti descritta l'implementazione di un sistema informativo a supporto della pianificazione e controllo del sistema di trasporto privato e pubblico con riferimento a tale contesto territoriale.

Nel quinto capitolo infine verrà proposta una metodologia per la calibrazione e attribuzione delle funzioni di costo agli archi del grafo basata sull'uso dei dati presenti nel sistema informativo, riportando alcuni risultati sperimentali ottenuti nella realizzazione del grafo della Provincia di Venezia.

**PARTE 1: MODELLI DI SIMULAZIONE PER L'ANALISI  
DELL'OFFERTA DEL SISTEMA DI TRASPORTO ALLA  
SCALA REGIONALE**

# **1 ANALISI E RAPPRESENTAZIONE DELL'OFFERTA DI TRASPORTO PRIVATO**

Nel presente capitolo si descriveranno gli aspetti salienti della modellizzazione dell'offerta di trasporto privato, considerando sia gli aspetti relativi alla descrizione topologica che quelli della valutazione prestazionale del deflusso sugli archi della rete. Nel primo paragrafo verranno quindi evidenziati i criteri che devono guidare nelle scelte alla base della schematizzazione, sottolineando come si debba inevitabilmente giungere a soluzioni di compromesso fra esigenze contrapposte.

Successivamente (secondo paragrafo) verrà presentata una rassegna delle diverse formulazioni per le funzioni di costo disponibili in letteratura. La descrizione verrà articolata presentando prima le forme funzionali relative a condizioni di deflusso ininterrotto e poi a condizioni di deflusso interrotto. Si mostreranno poi alcuni esempi di modellizzazioni che cercano di affrontare la descrizione da un punto di vista più generale, volte a descrivere condizioni di tipo eterogeneo. Infine verrà fatto cenno ad un approccio mirato a contemperare le esigenze di una rappresentazione sintetica del fenomeno del deflusso con una più chiara comprensione dei meccanismi insiti nello stesso.

### ***1.1 La modellizzazione della rete stradale: criteri ed effetti nella scelta della schematizzazione***

Nel presente paragrafo verranno delineati alcuni criteri generalmente adottati per la zonizzazione dell'ambito territoriale di interesse (area di studio) e per la definizione della rete. In questi casi la scelta finale è il risultato di un compromesso fra due obiettivi contrastanti: la precisione dei risultati e la minimizzazione dei costi.

Occorre aggiungere che, ai fini di un utilizzo previsionale, il problema della stabilità delle informazioni nel tempo scoraggia l'utilizzo di un elevatissimo livello di dettaglio, quand'anche ciò non fosse impedito da vincoli di carattere economico.

Nel seguito si forniscono alcune indicazioni relative alle diverse fasi della modellizzazione dell'offerta, da tener presenti ricordando però come il processo di schematizzazione sia caratterizzato in ogni caso da un notevole margine di discrezionalità.

#### **1.1.1 La rappresentazione dell'area di studio (zonizzazione)**

In particolare nella definizione della zonizzazione bisognerà tener presente i seguenti aspetti:

1. La dimensione delle zone deve essere tale che gli errori dovuti alla semplificazione indotta dall'aggregazione spaziale degli spostamenti si mantengano su livelli accettabili.

2. La zonizzazione deve essere compatibile con altre suddivisioni amministrative, in particolare con le zone censuarie, in maniera da poter utilizzare i dati statistici necessari alla descrizione del sistema territoriale e delle attività (popolazione, attivi, addetti, mobilità sistematica) disponibili per tali unità.
3. Le zone dovrebbero essere omogenee per quanto riguarda la destinazione d'uso del territorio e la composizione della popolazione.
4. Una zona dovrebbe rappresentare un bacino di traffico, in altre parole dovrebbe essere “convessa” in senso trasportistico, ed il suo connettore dovrebbe rappresentare il costo medio di accesso all'elemento di rete che mette in relazione la zona con il resto del territorio.
5. Le zone devono avere analoghe dimensioni (fatta salva la distinzione fra zone interne ed esterne) in termini di unità di tempo di viaggio, pertanto si dovrebbero avere zone più piccole nelle aree congestionate rispetto alle aree non congestionate.

Va aggiunto inoltre che, dovendosi sviluppare una zonizzazione specifica per un determinato studio e contesto di decisione, è preferibile che sia comunque compatibile con zonizzazioni preesistenti, al fine di disporre di elementi significativi di comparazione.

In tal senso si può adottare una zonizzazione strutturata gerarchicamente, in cui i diversi livelli di dettaglio sono fra loro relazionati, in maniera tale che le zone della schematizzazione più dettagliata siano il risultato di un'ulteriore suddivisione delle zone del livello più aggregato. A tale scopo, una opportuna organizzazione dei dati mediante sistemi di gestione di basi di dati può comportare indubbi vantaggi.

Si segnala, infine, la presenza in letteratura di studi finalizzati ad evidenziare l'impatto che diverse tipi di zonizzazione hanno sugli esiti delle simulazioni dell'interazione fra domanda e offerta [5], mentre un'interessante proposta di utilizzo dei sistemi GIS per la costruzione della zonizzazione è presente in [43] e [42].

### **1.1.2 Descrizione della topologia della rete**

Anche per quanto concerne il livello di dettaglio nella rappresentazione degli elementi del grafo sono possibili diverse soluzioni. Ancora una volta, considerazioni economiche portano ad escludere alcuni archi dalla schematizzazione; del resto non avrebbe senso includere un numero ampio di strade e poi effettuare una simulazione grossolana dei perditempi alle intersezioni. È inoltre di scarsa efficacia dettagliare il grafo in presenza di zonizzazioni grossolane, poiché in tal caso i risultati sarebbero inficiati dai relativi errori di aggregazione, dovuti alle connessioni dei centroidi al grafo.

È opportuno ricordare che uno studio sull'influenza del dettaglio del grafo sugli esiti del processo di assegnazione [41] ha evidenziato come, essendo maggiore l'incertezza nella valutazione prestazionale degli archi corrispondenti a strade aventi caratteristiche geometrico-funzionali inferiori (piuttosto eterogenee fra loro), l'inclusione di quest'ultime comporti un aumento degli errori.

### **1.1.3 Valutazione prestazionale degli archi della rete**

#### **1.1.3.1 Funzioni di costo d'arco: definizione e attributi**

Un altro passo fondamentale nella costruzione del modello di offerta, che può influenzare fortemente i risultati prodotti nella fase di assegnazione, è costituito dalla scelta delle funzioni di costo da associare agli archi del grafo ([7],[44], [32]).

Percorrere un determinato arco nell'effettuazione di uno spostamento comporta per l'utente una disutilità, la cui percezione determina le scelte di viaggio.

Tale disutilità è legata a diversi fattori non omogenei fra loro, alcuni dei quali non quantificabili (perlomeno facilmente ed in modo esatto). In generale essa viene espressa attraverso una grandezza scalare, il costo generalizzato di trasporto, che, mediante opportuni coefficienti di equivalenza, include gli oneri legati alle principali voci di costo.

Si deve constatare come, oltre agli attributi concorrenti a determinare essenzialmente il tempo di percorrenza (lunghezza, velocità, capacità, ecc.), presenti in numero maggiore

o minore a seconda del modello utilizzato (es. durata del ciclo semaforico e delle diverse fasi nel caso delle intersezioni semaforiche), sarebbe opportuno includerne altri che influenzano il comportamento di scelta in varia misura come pedaggi, segnaletica verticale, consumo di carburante (cfr. [55] e [72]).

Va ricordato, anche in questo caso, come (in analogia a quanto avviene nel problema specifico della valutazione del tempo di percorrenza di cui si dirà in seguito) sia comunque opportuno utilizzare formulazioni che facciano uso di grandezze facilmente quantificabili e di dati agevolmente reperibili.

È inoltre opportuno moltiplicare ognuna delle diverse voci per un particolare coefficiente, che tenga conto del diverso livello di percezione di tali costi riscontrabile mediamente negli utenti.

La funzione di costo di un arco della rete di trasporto è la formulazione matematica che mette in relazione suddetto costo al flusso sull'arco stesso e in generale anche ai flussi che percorrono altri archi del grafo. Di norma queste funzioni si basano sull'ipotesi di descrivere condizioni stazionarie e comportamenti medi.

Nel ricavare tali funzioni, il calcolo del tempo di percorrenza riveste un ruolo particolarmente importante ed, in alcuni casi (soprattutto in ambito urbano), è l'unica voce di costo ad essere considerata nel modello.

Nel caso in cui si faccia l'ipotesi semplificativa di dipendenza dal solo flusso dell'arco considerato la funzione di costo verrà detta separabile, nel caso contrario, più generale, si parlerà di funzioni di costo non separabili. L'ipotesi di indipendenza dai flussi sugli altri archi risulta piuttosto problematica in certe situazioni e specificatamente in presenza di intersezioni o di strade bidirezionali a due corsie; tuttavia tale assunzione agevola la stima di tali funzioni e lo sviluppo di metodi per l'assegnazione e pertanto viene generalmente adottata.

Il tempo di percorrenza è legato al flusso transitante nell'arco in ragione del fenomeno del condizionamento ed in maniera inversa a quanto accade con la velocità di percorrenza.

La velocità di percorrenza, infatti, assume valore massimo in corrispondenza di flussi nulli, allorquando ogni veicolo può viaggiare alla velocità desiderata (o libera) del conducente. Con tale termine s'intende quel valore di velocità che è dovuto solo al

desiderio del guidatore di sfruttare le potenzialità del mezzo nei limiti imposti dalle condizioni morfologiche dell'infrastruttura.

Tale situazione si verifica soltanto per valori molto bassi di flusso; al suo aumentare, invece, si manifesta il condizionamento dovuto alla presenza di veicoli più lenti, che assume carattere predominante allorquando non risulti più possibile l'effettuazione di manovre di sorpasso. Pertanto l'aumento del flusso è accompagnato da una diminuzione di velocità, fintantoché non si raggiunge un valore, detto capacità, oltre al quale il flusso transitante non può essere ulteriormente aumentato (tratto di color verde del diagramma velocità-flusso in Figura 1-1).

Nel caso in cui la domanda di utilizzo raggiunga valori superiori alla capacità, si verificheranno fenomeni di congestione, in cui flusso e velocità diminuiscono contemporaneamente, descrivendo il ramo inferiore (di colore rosa) della curva in Figura 1-1.

Queste situazioni sono caratterizzate da improvvisi arresti della corrente; pertanto il tratto inferiore della curva corrisponde alla zona di instabilità (mentre il ramo superiore individua la zona di stabilità).



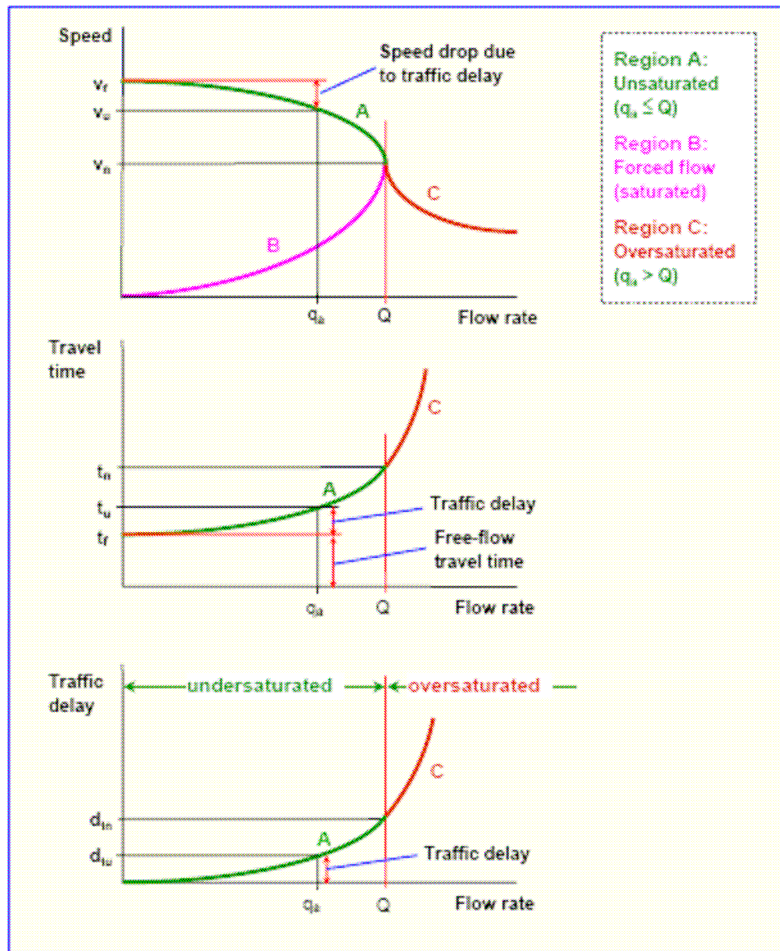


Figura 1-1 – Andamento di velocità media nello spazio, tempo di percorrenza, flusso transitante al variare della domanda d’uso di un arco della rete stradale. Fonte: ([3]).

Dal momento che la ragion d’essere delle funzioni di costo risiede nel loro utilizzo in fase di assegnazione, risulta importante considerare i requisiti che tale utilizzo presuppone ([64]):

1. Realismo nella modellazione del tempo di viaggio;
2. Andamento monotono non decrescente della funzione di costo, condizione necessaria ad assicurare la convergenza dell’algoritmo ad un’unica soluzione;
3. Continuità e differenziabilità;
4. Dominio (con valori finiti) esteso anche a valori di flusso superiori alla capacità, anche se ciò teoricamente non è corretto. In tal modo, infatti, si consente al processo iterativo di assegnazione di proseguire fino alla soluzione, nel caso alcuni rami presentino condizioni di sovrasaturazione nelle prime fasi (tali archi

sono comunque destinati a scaricarsi nelle successive iterazioni verso l'equilibrio, in virtù degli alti costi conseguenti al sovraccarico stesso).

5. Facile trasferibilità da un contesto all'altro. A tal fine sarebbe opportuno utilizzare nelle formulazioni grandezze standard dell'ingegneria del traffico come velocità a flusso libero e capacità.

Inoltre è consigliabile, seppur non necessario, al fine di velocizzare la convergenza dell'algoritmo di assegnazione, che la derivata prima della funzione di costo,  $f(x)$ , soddisfi anche alle seguenti condizioni in tutto il dominio:

1.  $f'(x) > 0$ , agevolando così il processo di redistribuzione dei flussi nelle varie iterazioni;
2.  $f'(x) < M\alpha$ , essendo  $M$  una costante positiva ed  $\alpha$  il valore della derivata in corrispondenza della capacità. In caso contrario si possono avere in alcuni casi valori eccessivamente alti di perditempo degli archi sovrasaturi nelle prime fasi dell'assegnazione, causando problemi di instabilità, perdita di precisione ed "overflow".

Esiste quindi, in ragione del quarto punto, un'altra differenza fra funzioni di costo e curve utilizzate nella teoria del deflusso veicolare, ben più sostanziale dell'uso del tempo di percorrenza anziché della velocità. Tale differenza consiste nella presenza di un tratto di curva, nella caso delle funzioni di costo, con valori superiori alla capacità (di colore marrone nella Figura 1-1).

È evidente come il quarto punto contrasti con quanto avviene nella realtà, dal momento che esiste un limite al numero dei veicoli che possono transitare, in un determinato intervallo di tempo, attraverso una sezione stradale.

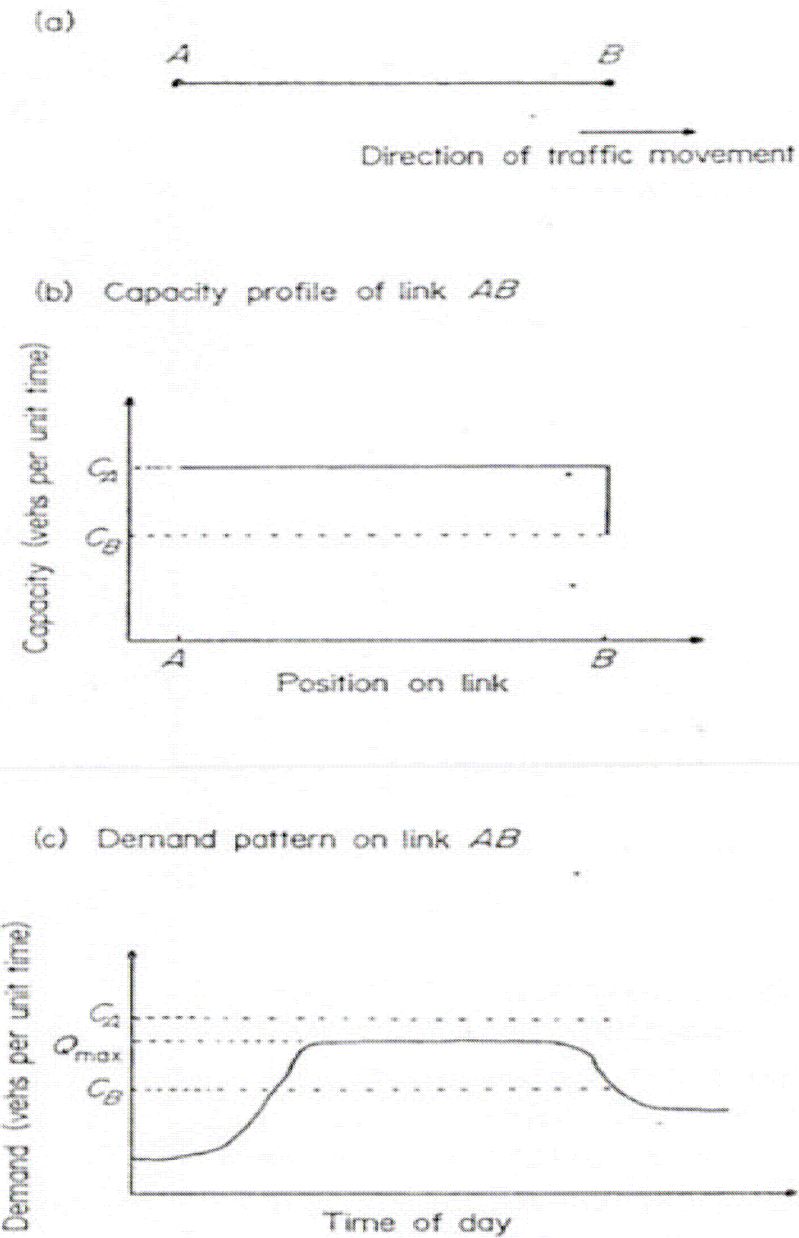
Inoltre nella realtà si verificano senz'altro, per brevi periodi, condizioni di sovraccarico della domanda, tuttavia i valori di flusso (in arrivo) superiori alla capacità sono in tal caso da riferirsi alla domanda d'uso e non alla portata transitante.

In simili circostanze i tempi di percorrenza assumono valori finiti in quanto legati alla durata finita di tali periodi di eccesso di domanda, mentre a condizioni di stazionarietà corrisponderebbero valori di perditempo infiniti.

Tali situazioni richiedono pertanto, per un'adeguata descrizione, di essere modellizzate attraverso un esplicito riferimento alla durata del periodo di sovrasaturazione, come si vedrà nel seguito (funzione di Akçelik, oppure attraverso l'uso di modelli dinamici).

Le problematiche testè evidenziate, legate al verificarsi di condizioni di non stazionarietà, presentano delle ricadute anche sul processo di calibrazione delle funzioni di costo. In particolar modo, nella scelta del sito e dell'intervallo di rilevazione, si dovrà avere l'accortezza di ricercare e verificare la presenza di condizioni di stazionarietà.

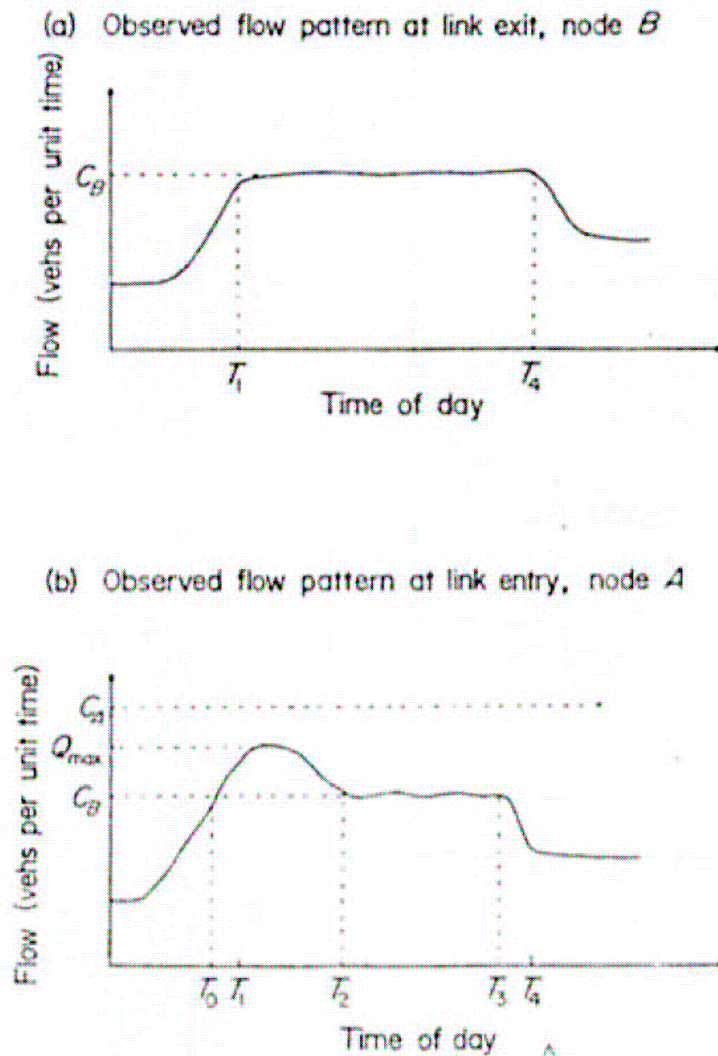
Un esempio in tal senso ([8]), rappresentato dalla seguente Figura 1-2, è dato dal caso di un'arco AB, caratterizzato da un'intersezione all'estremità finale avente capacità ( $C_B$ ) inferiore al valore di capacità ( $C_A$ ) del resto dell'arco. Si ipotizza che tale arco sia interessato da un profilo temporale di domanda d'utilizzo, con un picco  $Q_{max}$  superiore a  $C_B$ . L'eccesso di domanda provocherà un accodamento che, nel corso del periodo di picco, si propagherà a ritroso lungo l'arco AB, a partire da B fino a raggiungere il nodo A. Successivamente, la diminuzione della domanda porterà ad uno smaltimento progressivo della coda, fino al ritorno a condizioni di non congestione in tutto l'arco.



**Figura 1-2 – Esempificazione dell’andamento nel tempo di un picco di domanda di utilizzo (c) di un’arco  $AB$  (a) con un’intersezione all’estremità finale avente capacità  $C_B$ , inferiore al valore di capacità  $C_A$  del resto dell’arco (b). Fonte: ([8]).**

Si può ipotizzare che nella porzione in cui si ha deflusso non congestionato i valori di velocità e flusso si mantengano costanti e superiori ai valori, anch’essi costanti, del tratto in cui si ha l’accodamento<sup>1</sup>. Contestualmente si avrà una continua variazione, nel corso dell’intervallo temporale considerato, del tempo di percorrenza dell’intero arco, in funzione del variare della lunghezza della coda.

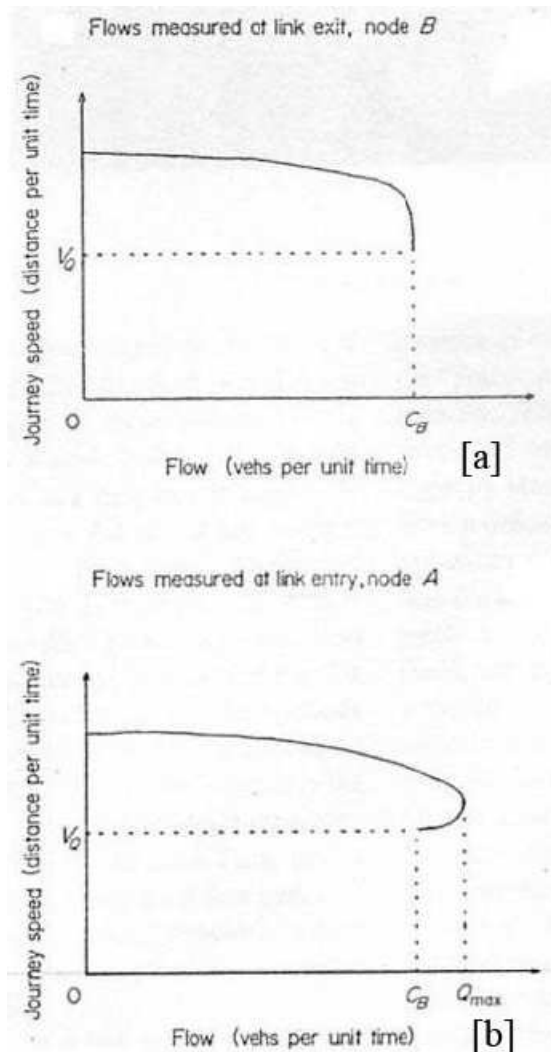
Si osservi in Figura 1-3 come i flussi misurati in corrispondenza dei due nodi di estremità, durante tale intervallo, presentino un andamento differente, cosa che accade anche per le velocità.



**Figura 1-3 – Andamento temporali dei flussi nelle sezioni di estremità dell'arco AB in corrispondenza di un picco di domanda. Fonte: ([8]).**

Conseguentemente si otterranno gli andamenti differenti della curve velocità-flusso riportati in Figura 1-4.

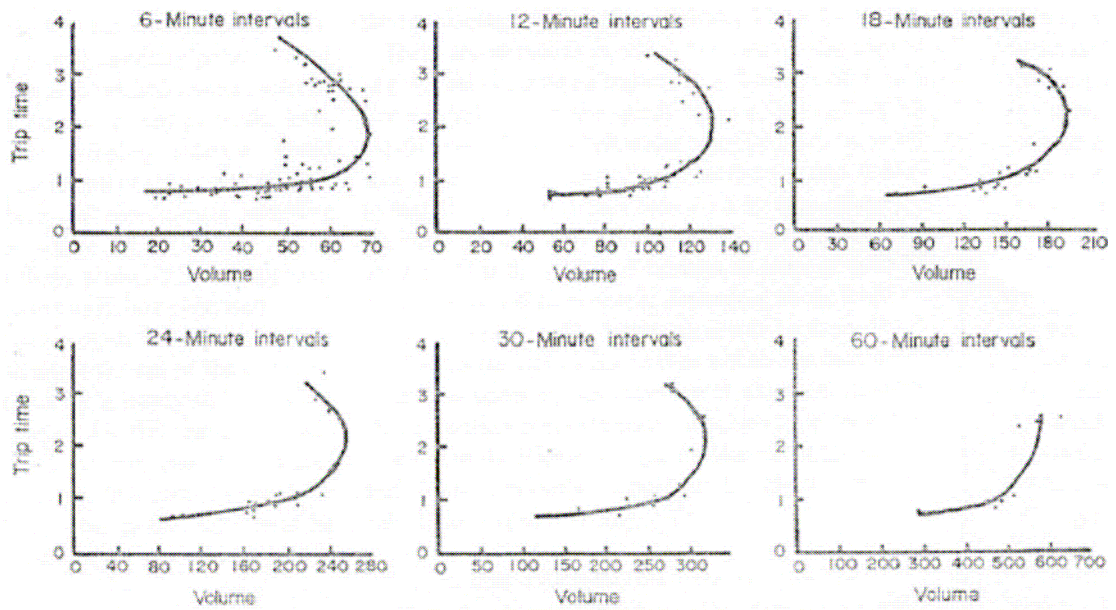
<sup>1</sup> Con l'eccezione di una zona di transizione posta immediatamente a ridosso della coda, trascurabile ai fini della presente analisi.



**Figura 1-4 – Differenti diagrammi velocità-flusso riscontrabili in due sezioni di estremità di uno stesso arco AB in corrispondenza di un intervallo di punta. Fonte: [8].**

Da tale esempio si può, quindi, evidenziare come le scelte effettuate nel posizionamento delle sezioni di rilievo possano influire sulla curva velocità-flusso rilevata (e conseguentemente anche tempo-flusso).

Un ulteriore elemento da considerare, in fase di calibrazione, è la scelta della dimensione degli intervalli di aggregazione dei dati. In Figura 1-5 si riporta un esempio ([8]) in cui risulta evidente l'effetto di attenuazione dei fenomeni che si ottiene mediando su intervalli temporali più ampi (con diminuzione di punti riferibili a particolari condizioni transitorie o estreme).



**Figura 1-5 – Effetto della scelta di diversi intervalli temporali di aggregazione nella relazione sperimentale tempo di percorrenza–volume. Fonte: [8].**

Si sottolinea, infine, come non vadano trascurate le problematiche connesse all'utilizzo di funzioni di costo separabili in contesti, quali quelli in prossimità delle intersezioni, ciò risulta poco rispondente alla realtà del fenomeno del deflusso (e più in generale l'incremento della varianza non spiegata che deriva dall'assenza nel modello di elementi che, invece, influenzano effettivamente il deflusso).

## **1.2 La specificazione della forma funzionale delle funzioni di costo: rassegna delle tipologie presenti in letteratura**

Nel presente paragrafo verrà presentata una rassegna dei principali esempi di funzioni di costo presenti in letteratura.

Con riferimento a quanto detto in precedenza, le forme funzionali presentate considereranno come unico attributo di costo il tempo di percorrenza, che pertanto costituisce la variabile dipendente.

Nelle varie tipologie di strada e in diversi contesti urbanistici, gli elementi esterni interferiscono con la corrente veicolare di un singolo arco con modalità assai differenti, comportando quindi differenti modellizzazioni.

Pertanto le forme funzionali adottate si differenziano in diverse categorie, in base al tipo di fenomeno analizzato ed in base alle variabili esplicative utilizzate.

Per quanto concerne il tipo di fenomeno si deve operare una distinzione fra condizioni (prevalenti) di deflusso ininterrotto, in cui la corrente veicolare non subisce arresti per cause ad essa estranee, e di deflusso interrotto, che si verificano in corrispondenza delle diverse tipologie di intersezioni.

Corrispondentemente si avranno due tipi di funzioni di costo alternative.

1. funzioni in cui il tempo di percorrenza dell'arco ( $t$ ) è ottenuto moltiplicando il tempo di percorrenza a flusso nullo ( $t_0$ ) per un coefficiente funzione del grado di saturazione ( $q/C$ ):

$$t = t_0 \cdot f\left(\frac{q}{C}\right) \quad \text{Eq. 1.1}$$

2. funzioni in cui il tempo di percorrenza dell'arco è dato dalla somma del tempo di percorrenza dell'arco ("tempo di running") e del tempo di attesa alle intersezioni ("tempo di waiting"):

$$t = T_{RUNNING} + T_{WAITING} \quad \text{Eq. 1.2}$$



La prima formulazione si adatta soprattutto a quei contesti, come quelli extraurbani o autostradali, in cui si può considerare accettabile l'ipotesi di una velocità sostanzialmente costante lungo tutto l'arco e nulli o trascurabili i tempi di attesa alle intersezioni.

Il secondo tipo di funzioni, invece, verrà adottato nei casi in cui il tempo di attesa alle intersezioni assume un'importanza rilevante, come nel caso delle reti stradali urbane.

Sono state inoltre proposte (cfr. § 1.2.4) delle formulazioni che cercano di superare tali suddivisioni, pervenendo a funzioni caratterizzate da una maggior generalità.

Per quanto concerne, invece, la scelta delle variabili esplicative, un approccio spesso adottato prevede l'utilizzo dal solo flusso veicolare, in particolar modo considerando, per quanto già visto, soltanto il flusso nell'arco considerato (funzioni di costo separabili).

Un'ulteriore alternativa prevede invece l'adozione anche di altre variabili esplicative, idonee a descrivere le caratteristiche geometriche, di controllo e di contesto della via.

Nei successivi paragrafi verrà presentata una rassegna delle funzioni di costo presenti in letteratura, trattando inizialmente le formulazioni relative a condizioni di flusso ininterrotto. Seguirà, quindi, una breve rassegna delle caratteristiche che contraddistinguono le funzioni idonee a descrivere condizioni di deflusso interrotto. Infine verranno presentate le formulazioni generali proposte per descrivere unitariamente situazioni eterogenee.

### **1.2.1 Funzioni di costo per condizioni di flusso ininterrotto**

Storicamente le prime formulazioni presentate per descrivere condizioni di flusso ininterrotto erano caratterizzate da una struttura di tipo lineare, formata da due distinti segmenti di retta consecutivi aventi diverso coefficiente angolare, con valore in comune in corrispondenza del limite di capacità. Le equazioni corrispondenti sono:

$$t = t_A + \alpha(q - c) \qquad \text{valida per } q < c ;$$

$$t = t_A + \beta(q - c) \quad \text{valida per} \quad q \geq c;$$

In cui, oltre ai simboli già utilizzati, sono presenti i parametri di calibrazione  $\alpha$  e  $\beta$  e si è posto:

$$t_A = t_0 + \alpha \cdot c$$

Successivamente si è riscontrato ([8]) un miglior adattamento ai dati sperimentali di funzioni di tipo curvilineo, in cui fosse presente il grado di saturazione (cfr. Eq. 1.1). Fra le prime vi è una funzione di tipo esponenziale, proposta da (Smock, 1962):

$$t = t_0 \cdot e^{\frac{q}{c}}$$

ed una sua generalizzazione (Overgaard, 1967):

$$t = t_0 \cdot \alpha \left[ \left( \frac{q}{c} \right)^\beta \right]$$

Tuttavia tali funzioni, non essendo integrabili in forma esatta, implicano una certa complessità computazionali negli algoritmi di assegnazione che le utilizzano.

Venne quindi proposta una formulazione che, in ragione della propria semplicità d'utilizzo, ha avuto notevole diffusione, ossia la funzione BPR ([9]):

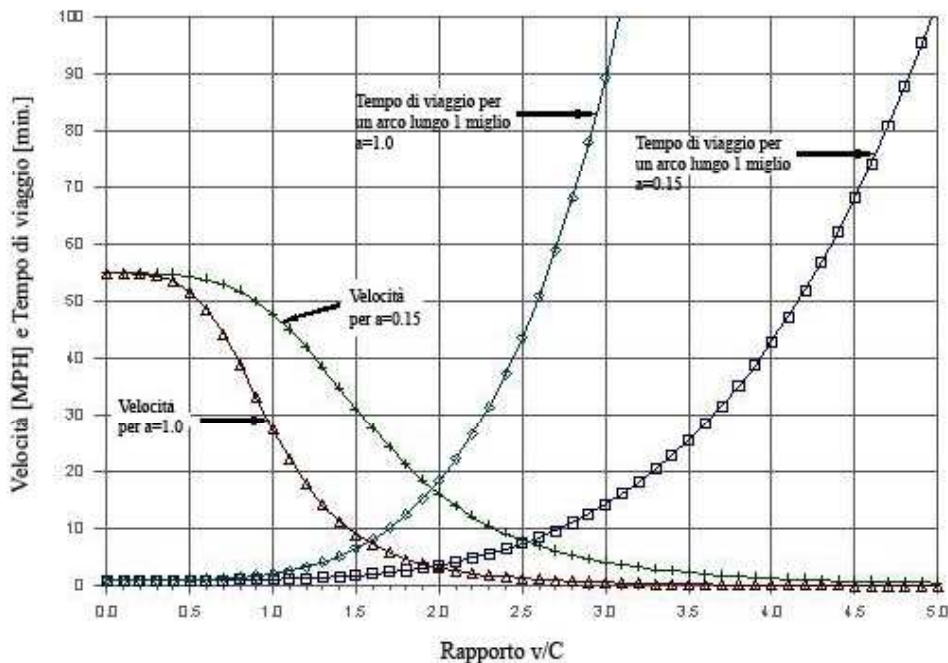
$$t = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{q}{c} \right)^\beta \right] \quad \text{Eq. 1.3}$$

Essa venne ottenuta a partire da dati sperimentali ricavati in freeways americane in condizioni non congestionate ([61]) alla fine degli anni cinquanta del secolo scorso<sup>1</sup>.

Il parametro  $\alpha$  deve essere positivo e corrisponde all'incremento di tempo di percorrenza che si ha in condizioni di flusso pari alla capacità rispetto al valore

corrispondente ad una condizione di flusso nullo. Il parametro  $\beta$ , invece, deve risultare maggiore di uno, determinando così notevoli incrementi del tempo di percorrenza per flussi superiori alla capacità.

Nella calibrazione originaria erano stati attribuiti i valori  $\alpha=0,15$  e  $\beta=4$  ai parametri di calibrazione. È opportuno sottolineare che in tale contesto il valore di capacità considerato era stato quello di capacità pratica, corrispondente al volume di servizio al livello di servizio C. Quindi si tratta di un valore che corrisponde all'80% circa della capacità assoluta, utilizzata nelle formulazioni che verranno presentate nel seguito della trattazione.



**Figura 1-6 - Grafico rappresentativo della funzione BPR per differenti valori dei parametri, adattato da [U.S. Department of Transportation, 2002].**

La forma funzionale della BPR ne agevola l'utilizzo in fase di assegnazione, essendo monotona crescente e differenziabile. D'altra parte si deve notare come essa risulti carente nella descrizione delle condizioni di congestione e il relativo tratto della curva, se non basato su ipotetico riferimento ad una durata prestabilita dell'intervallo di

<sup>1</sup> Nell'ambito delle rilevazioni effettuate per lo studio che ha portato alla realizzazione dell'edizione del 1965 del manuale HCM.

sovrasaturazione, appare meramente strumentale al funzionamento degli algoritmi di assegnazione.

Del resto nella formula BPR il perditempo, anche in tali condizioni, risulta proporzionale alla lunghezza dell'arco (essendo proporzionale al tempo di percorrenza a flusso nullo), mentre in realtà è legato al numero di veicoli in coda ed al tasso di smaltimento della coda stessa.

Inoltre le suddette caratteristiche di semplicità hanno portato all'utilizzo della BPR, anche in ambiti a volte piuttosto differenti (ad esempio contesti urbani con presenza di intersezioni semaforizzate) da quello in cui è stata originariamente calibrata<sup>1</sup>.

Fra le molte calibrazioni presentate nel corso degli anni vi è quella proposta da Steenbrink nel contesto olandese ([65]) che prevede i valori  $\alpha=2,62$  e  $\beta=5$ . È stata ottenuta in parte su dati sperimentali, in parte su valori ritenuti validi in base a valutazioni legate all'esperienza degli ingegneri del traffico olandesi (in particolare per quel che concerne alti valori del rapporto flusso/capacità).

Il valore di capacità considerato in tal caso, come quelli che saranno riportati in seguito, è stato quello di capacità assoluta.

In tempi più recenti Horowitz utilizzò il metodo dei minimi quadrati per ottenere i parametri a e b della BPR che permettessero di ottenere una curva che si adattasse a quelle presenti nell'edizione del 1985 dell'HCM.

In seguito ([61]) è stata effettuata un'analoga calibrazione con riferimento alle curve presenti nell'edizione 1994 del manuale HCM e successivamente convalidando i risultati attraverso lo studio di un esempio tramite software di microsimulazione<sup>2</sup>. Sono stati ottenuti (con riferimento al caso delle freeway) i valori  $\alpha=0,2$  e  $\beta=10$ . Tali risultati corrispondono alla tendenza che, nel corso degli anni, ha portato a diminuire il divario fra velocità a flusso nullo e velocità in corrispondenza della capacità ([38], [2]).

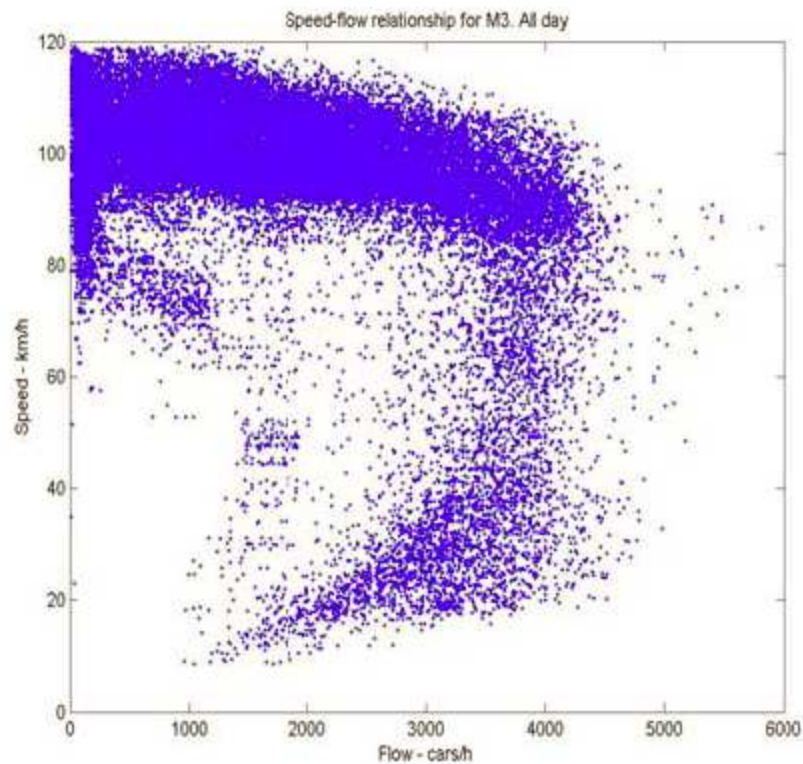
Vanno tuttavia sottolineate in tal senso le diversità indotte dalle caratteristiche peculiari dei diversi contesti. Si nota infatti una notevole variabilità legata a differenti regolamentazioni presenti nei diversi stati. Tali differenze riguardano la presenza o

---

<sup>1</sup> L'utilizzo nell'ambito di condizioni diverse dal caso autostradale, con presenza anche di flusso interrotto, verrà descritto nel proseguio della presente tesi (cfr. § 1.2.5.1).

<sup>2</sup> È stato utilizzato il software FREQ nell'analisi di un tratto autostradale di 12,8 km di cui si disponevano dati ricavati da spire induttive e veicoli test.

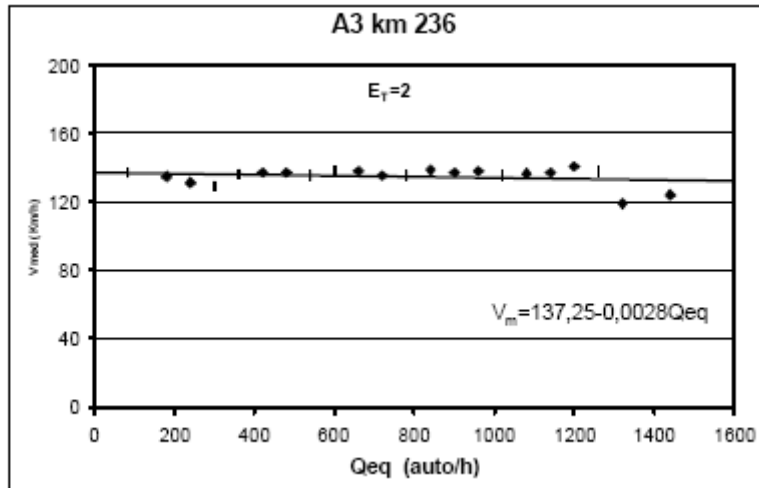
meno di limiti di velocità<sup>1</sup> e nella regolamentazione delle manovre di cambio corsia. A tal proposito si ricorda come le regole ed il comportamento degli automobilisti negli USA comporti un utilizzo delle corsie delle tratte autostradali come corsie parallele. Ciò implica meno sorpassi ed una velocità meno elevata anche in condizioni di deflusso non saturo e d'altra parte un maggiore e più uniforme utilizzo della capacità delle diverse corsie autostradali. In Europa si riscontrano invece una velocità a flusso libero maggiore ed un meno omogeneo utilizzo delle corsie con conseguente riduzione di capacità dell'infrastruttura. Per quanto riguarda il contesto europeo si citano recenti studi nei contesti tedesco ([76]), austriaco [48] danese [52] ed i risultati di recenti studi nel contesto italiano (De Luca, 2003), come quello riportato in figura 1.8:



**Figura 1-7** Punti sperimentali velocità-flusso rilevati nell'anello stradale attorno a Copenhagen.  
**Fonte:** [52]

---

<sup>1</sup> Ad esempio in molti tratti delle autostrade tedesche nella terza corsia non si ha la prescrizione di alcun limite di velocità.



**Figura 1-8**

Relativamente al contesto italiano sono stati proposti, nel caso autostradale i seguenti valori indicativi:  $\alpha = 0,1$  e  $\beta = 1$  ([29]). È stata proposta inoltre una formulazione leggermente dissimile ([14])

$$t = \frac{L}{v_0} + \gamma_1 \left( \frac{L}{v_c} - \frac{L}{v_0} \right) \left( \frac{q}{C} \right)^{\gamma_2} \quad \text{Eq. 1.4}$$

In cui oltre ai parametri  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  si ha:

L: lunghezza dell'arco;

$v_c$ : velocità di percorrenza in corrispondenza a valori di flusso pari alla capacità C.

Una differenza più marcata presenta invece la funzione proposta dal CETUR ([44]), in contesto francese:

$$t = t_0 \cdot \frac{1,1 - a \cdot \frac{q}{C}}{1,1 - \frac{q}{C}} \quad \text{Eq. 1.5}$$

In cui per il parametro a, legato alla tipologia di strada, devono essere:

$$0 \leq a \leq 0,66$$

Tale formulazione, è stata sviluppata con riferimento ad ambiti di tipo urbano.

### 1.2.1.1 *Le coniche di Spiess*

Spiess [64] propose una formulazione che, pur corrispondendo ad una curva simile a quella della BPR, risultasse computazionalmente efficiente.

Infatti la BPR, soprattutto nel caso di valori alti di  $\beta$ , può produrre situazioni di instabilità durante l'esecuzione dell'algoritmo di assegnazione nel caso di valori molto elevati flusso (marcata sovrasaturazione); provocando enormi aumenti dei perditempo anche per piccoli incrementi di flusso.

D'altro canto in condizioni di sottosaturazione si verifica una certa insensibilità a variazioni di flusso; in tali casi rimarchevoli variazioni dei flussi non provocano sensibili variazioni dei perditempo, con conseguenti difficoltà nel processo di redistribuzione dei flussi.

Inoltre l'utilizzo della BPR richiede il calcolo di due funzioni trascendenti oneroso in termini numerici.

Considerando quindi tali inconvenienti ed i requisiti in fase di assegnazione Spiess [64] propose le seguenti coniche:

$$t = t_0 \left[ 2 + \sqrt{a^2 \cdot (1-x)^2 + b^2} - a \cdot (1-x) - b \right] \quad \text{Eq. 1.6}$$

In cui si è posto:

$$t = (2a-1)/(2a-2).$$

Nello studio, oltre ai già citati requisiti (cfr. 1.1.3.1), venne considerato necessario anche imporre che il tempo di percorrenza per flussi pari alla capacità risultasse doppio di quello a flusso nullo.

Tale vincolo, in contraddizione con molteplici evidenze sperimentali, viene motivata dall'esigenza di compatibilità con la funzione BPR. Va osservato che, nel far ciò, si è fatto riferimento ad un particolare valore del parametro  $\alpha$  della BPR, pari ad uno.

Tali curve risultano crescere in maniera non eccessivamente rapida in sovrasaturazione e manifestano comunque variazioni apprezzabili anche per bassi valori di flusso.

Pertanto un test effettuato, con riferimento alla rete della città di Basilea, sul loro utilizzo ha evidenziato una maggior facilità nel giungere a convergenza, pur non discostandosi sostanzialmente nell risultato finale, rispetto all'uso della calibrazione della BPR adottata ([64]).

### 1.2.1.2 La funzione di Davidson

La ricerca di una formulazione di carattere generale, fondata su basi teoriche, portò alla proposta da parte di Davidson della seguente funzione:

$$t = t_0 \left[ 1 + \frac{J_D \chi}{(1 - \chi)} \right] \quad \text{Eq. 1.7}$$

In cui, oltre ai simboli già visti, si ha :

$J_D$  : parametro di ritardo<sup>1</sup>;

$\chi = q/C$  : grado di saturazione.

Tale formulazione è stata elaborata mutuando concetti propri della teoria delle code per applicarli a condizioni di deflusso ininterrotto, ma senza un procedimento di rigorosa derivazione.

Più precisamente, Davidson considerò la formulazione del ritardo ( $d$ ) nel caso di singolo canale con arrivi casuali e tempi di servizio distribuiti esponenzialmente:

$$d = \frac{1}{Q} + \frac{\chi}{Q(1 - \chi)} \quad \text{Eq. 1.8}$$

In cui il primo addendo rappresenta il tempo di servizio, reciproco del tasso di servizio  $Q$  (che corrisponde alla capacità nel caso della teoria del deflusso), mentre il secondo quantifica il perditempo in coda.

Sostituendo nell'Eq. 1.8 il tempo di servizio con il tempo di percorrenza a flusso nullo e moltiplicando il termine di ritardo in accodamento per un parametro di ritardo,  $J_D$ , si ottiene l'Eq. 1.7.

Tuttavia la sostituzione effettuata appare quantomeno arbitraria: essa porta a delle incoerenze, rilevate da diversi autori, ad esempio non appare giustificabile il fatto di porre:

$$t_0 = \frac{1}{C}$$

mentre in realtà il flusso alla capacità è legato, in relazione inversa, agli intertempi (in corrispondenza di flussi pari alla capacità); si noti, inoltre, che tale relazione viene posta

---

<sup>1</sup> In alternativa, alcune formulazioni presentano il parametro di qualità di servizio  $m = 1 - J_D$ .



manca un riferimento alla lunghezza dell'arco e contrasta con l'equazione fondamentale della teoria del deflusso  $q = k \cdot v$  (avendo indicato con  $k$  la densità veicolare).

L'autore propose quindi una differente derivazione della formula, partendo dal considerare il perditempo in un'arco come dato dalla somma del perditempo a flusso nullo e di un termine,  $d_q$ , che esprime la somma dei ritardi in accodamento lungo l'arco.

$$t = t_0 + \sum d_q$$

Sostituendo il secondo termine con il termine di accodamento della Eq. 1.8 e moltiplicandolo per un parametro,  $k'$ , che tiene conto della distribuzione e caratteristiche degli elementi che causano accodamento lungo l'arco (estendendo il concetto al caso di tratti privi di intersezioni), si ottiene:

$$t = t_0 + k' \frac{\chi}{C(1-\chi)} \tag{Eq. 1.9}$$

Quindi ponendo  $J_D = \frac{k'}{Ct_0}$ , si ottiene nuovamente la Eq. 1.7. Tuttavia anche questa

impostazione comporta delle incoerenze, insite ad esempio nel fatto di porre il parametro di ritardo inversamente proporzionale a  $t_0$ ; in tal caso, infatti, la "qualità del servizio" aumenterebbe all'aumentare del tempo di percorrenza a flusso nullo.

Le difficoltà nella derivazione e definizione dei parametri sono probabilmente alla base delle difficoltà riscontrate nella calibrazione del parametro di ritardo ([66]).

Si sottolinea inoltre che la Eq. 1.7 è limitata, nel dominio ai valori inferiori alla capacità, presentando in corrispondenza ad essa un asintoto. Ciò contrasta, tra l'altro, con le esigenze del suo utilizzo in fase di assegnazione.

È stata pertanto proposta una formulazione della funzione di Davidson dipendente dal tempo (ossia dall'intervallo temporale di analisi), per la quale tuttavia permangono le problematiche descritte per quanto concerne la derivazione e definizione dei parametri. Infatti l'utilizzo del metodo di trasformazione delle coordinate<sup>1</sup> consente di ottenere una formula in cui si ottengono valori finiti anche per flussi pari o superiori alla capacità, con riferimento ad un intervallo temporale finito di analisi,  $T_f$ , in cui si assume costante la domanda di utilizzo dell'arco. In tal modo risulta:

---

<sup>1</sup> Descritto nel seguito.

$$t = t_0 \left\{ 1 + 0,25 r_f \left[ z + \sqrt{z^2 + \frac{8 J_D \chi}{r_f}} \right] \right\} \quad \text{Eq. 1.10}$$

In cui si è posto:

$$z = \chi - 1;$$

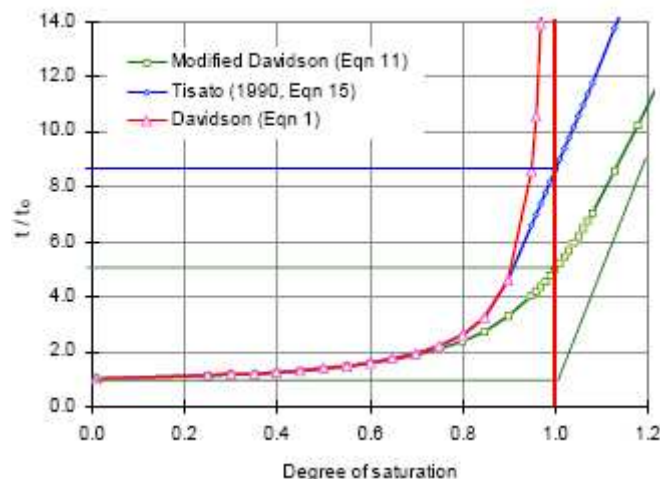
$r_f = T_f / t_0$ , avendo espresso  $T_f$  e  $t_0$  nelle stesse unità di misura.

Nella seguente figura vengono mostrate le curve corrispondenti alla formulazione originaria (stazionaria) e di quella dipendente dal tempo della funzione di Davidson, con riferimento al caso in cui si abbia:

- $T_f = 1$  ora;
- $V_0 = 80$  km/h;
- $J_D = 0,4$ .

È inoltre presente una formulazione modificata della funzione di Davidson proposta da Tisato ([67]).

In conclusione si può affermare che la funzione di Davidson, pur con le problematiche evidenziate, ha costituito un interessante tentativo di uscire da un approccio puramente empirico ed ha aperto la strada a formulazioni di carattere generale (che saranno descritte nel seguito), le quali permettono di descrivere mediante un approccio unificato le diverse condizioni di deflusso.



**Figura 1-9 – Rappresentazione dell’andamento della funzione di Davidson, della versione modificata proposta da Tisato e della formulazione dipendente dall’intervallo temporale di riferimento. Fonte: [1].**

### 1.2.1.3 Funzioni di costo per strade bidirezionali a due corsie

Nelle strade bidirezionali a due corsie l'effettuazione della manovra di sorpasso, necessaria al mantenimento della velocità desiderata in presenza di veicoli più lenti, richiede l'utilizzo della corsia destinata al transito dei veicoli nella direzione di marcia opposta. Pertanto la velocità media del tronco stradale è funzione del flusso in entrambe le direzioni.

Sulla base di queste considerazioni sono stati proposti adattamenti della BPR che fanno riferimento al grado di saturazione dell'insieme delle due direzioni opposte.

In ragione di ciò Horowitz, basandosi sulle risultanze del manuale HCM (versione 1985) stimava, nel caso di assenza di flusso in senso opposto, la capacità degli archi bidirezionali ad una corsia in circa 2000 veic/ora per corsia. Tuttavia con una distribuzione uguale dei flussi fra le due direzioni, tale valore scende a 1400 veic/ora<sup>1</sup>.

Quindi in linea generale proponeva di aggiungere al flusso nella direzione considerata il 40% del flusso nella direzione opposta.

Un valore di riferimento per la capacità complessiva delle due direzioni è quello proposto dall'HCM, pari a 2800 veic/ora; tale valore è riferito alle condizioni ideali, ossia ad un flusso di sole autovetture ed una carreggiata con corsie larghe 3,75 m e banchine da 1,50 m. Tale valore viene considerato in un adattamento della BPR, proposto per le strade bidirezionali a due corsie in cui si tiene conto della somma dei flussi nelle due direzioni ([29]):

$$t = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{q_1 + q_2}{C_{tot}} \right)^\beta \right] \quad \text{Eq. 1.11}$$

In cui si sono indicati con  $q_1$  e  $q_2$  i flussi nelle due direzioni e con  $C_{tot}$  la capacità complessiva della carreggiata.

Relativamente al contesto italiano sono stati proposti ([29]), con riferimento alla tipologie di strada definite nelle vecchie norme CNR, i seguenti valori indicativi dei parametri:

---

<sup>1</sup> Tenendo conto dei coefficienti di equivalenza dei mezzi pesanti e degli opportuni fattori correttivi legato alle condizioni della carreggiata, orografiche ecc.

- $\alpha=1,0$  e  $\beta=2,5$  per il tipo IV CNR (corsie da 3,75 m e banchine da 1,50 m);
- $\alpha=3,0$  e  $\beta=4,0$  per il tipo VI CNR (corsie da 3,0 m e banchine da 1,0 m);

Un' altra formulazione ([14]) prevede la seguente forma funzionale:

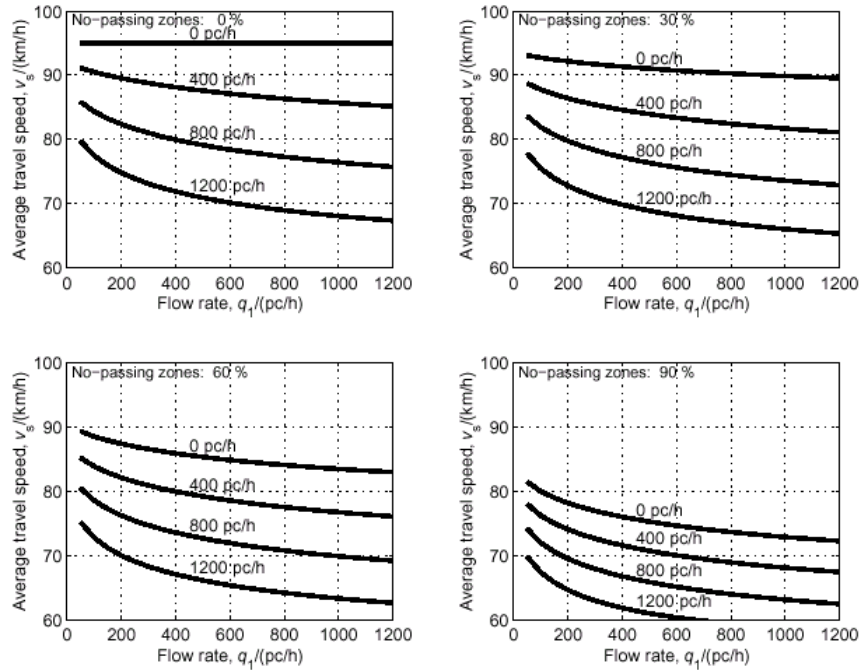
$$t = t_0 + \alpha(t_c - t_0) \left( \frac{q_1 + q_2}{C_{tot}} \right)^\beta \quad \text{Eq. 1.12}$$

In cui si è indicato con  $t_c$  il tempo di percorrenza per valori di flusso pari alla capacità.

Un'approfondita analisi delle modalità di deflusso nel caso delle strade extraurbane è stato proposto da Luttinen che ha sviluppato un modello che valuta in termini probabilistici l'effetto di condizionamento legato all'eterogeneità delle velocità desiderate dei veicoli della stessa direzione di percorrenza e le possibilità dell'effettuazione delle manovre di sorpasso, per mantenere tali velocità, legandoli alla distribuzioni dei tratti in cui è possibile effettuare il sorpasso e dei vuoti nella corrente veicolare opposta.

Tale modello, piuttosto complicato, permette di evidenziare l'effetto dei vari elementi che determinano le prestazioni di tale tipologia di strade.

Ad esempio in Figura 1-10. sono riportati i diversi andamenti della curva velocità-flusso al variare del flusso nella direzione opposta.



**Figura 1-10 – Andamento della curva velocità flusso nel caso delle strade bidirezionale a due corsie per diversi valori del flusso nella direzione opposta e della percentuale di strada in cui è possibile effettuare il sorpasso. Fonte: [47].**

Si osservi che la curva velocità-flusso presenta una curvatura con la concavità rivolta verso l'alto. Tale andamento, peculiare della tipologia di strade considerata, trova riscontro in altre fonti ed è legato ad una particolare modalità del manifestarsi del condizionamento, già significativo per bassi valori di flusso. Si può ipotizzare che tale fenomeno derivi dalla notevole eterogeneità delle velocità dei veicoli che percorrono una stessa corsia ed in cui la manovra di sorpasso è resa problematica. Tale andamento è confermato da risultanze sperimentali come quelle proposte in [76] riportate nella seguente figure.

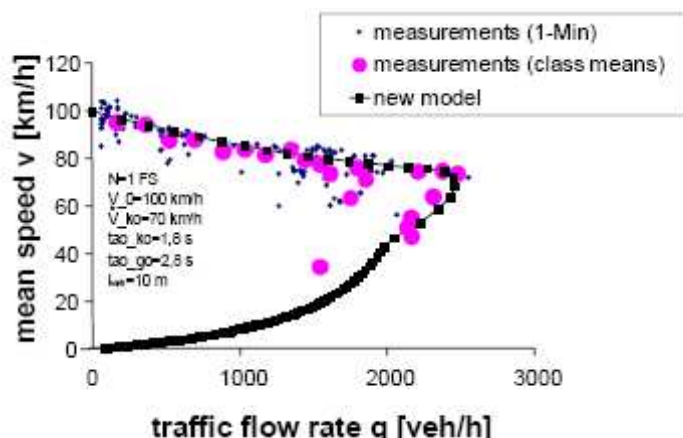


Figura 1-11 - Andamento del diagramma velocità- flusso nel caso di strade bidirezionali a due corsie. Fonte: [76].

#### 1.2.1.4 Forme funzionali con esplicito riferimento alle caratteristiche degli archi

Nelle forme funzionali finora presentate il flusso nell'arco risulta essere l'unica variabile indipendente presente. Ciò comporta il fatto di dover rendere conto dell'influenza delle caratteristiche fisiche e funzionali dell'arco in forma implicita, attraverso la scelta di opportuni coefficienti di calibrazione.

Al fine di esplicitare tali dipendenze sono stati effettuati diversi studi, sia in Italia che all'Estero; va ricordato comunque che tali formulazioni risultano in genere ancorate in modo non trascurabile alle realtà in cui sono state calibrate.

L'approccio consueto consiste nel determinare in maniera indipendente la velocità a flusso libero  $V_1$ , funzione delle sole caratteristiche geometriche, per poi inserire anche la dipendenza dei flussi  $V_2$ ; si ha dunque:

$$V = V_1(G, F) + V_2(q_1, q_2) \quad \text{Eq. 1.13}$$

dove G ed F rappresentano le caratteristiche geometriche e funzionali mentre  $q_1$  e  $q_2$  il flusso dei veicoli leggeri e pesanti rispettivamente.

Si constata la presenza di una nutrita letteratura volta ad evidenziare l'influenza sulla velocità delle sole caratteristiche morfologiche del tracciato. In ambito italiano, si

ricordano, fra gli altri, analisi volte alla realizzazione di un modello comportamentale ([23]) o alla definizione di una grandezza, la velocità ambientale, che consideri globalmente le caratteristiche del tracciato ([17]). Tali studi, essendo finalizzati all'elaborazioni legate alla fase di progettazione dell'infrastrutture (ad esempio il diagramma delle velocità lungo il tracciato), portano l'analisi ad un livello di dettaglio maggiore rispetto a quello che caratterizza la fase di pianificazione, soprattutto in quanto onerosa in termini di contenuto informativi; d'altra parte, l'introduzione e diffusione dei Catasti Stradali informatizzati potrebbe permettere di limitare quest'aspetto del problema, mediante l'utilizzo di un sistema informativo integrato<sup>1</sup>.

Più limitante invece risulta la riduzione della componente ambientale, che determina assieme alle componenti Uomo e Veicolo, la velocità di marcia, alle sole caratteristiche morfologiche del tracciato.

La determinazione dell'influenza dei diversi aspetti legati al contesto ambientale è invece resa possibile tramite formulazioni che esplicitano il contributo degli aspetti di contesto (es. caratteristiche urbanistiche a lato strada) attraverso grandezze esplicative aggregate, anche se ciò comporta, in qualche caso, delle difficoltà nella loro interpretazione e quantificazione.

Fra i vari modelli presenti in letteratura, vi è la formulazione proposta da Yagar (1984):

$$v = 91 + 12EL - 1G - 8Lnd + 0,75(LVel - 80) - 13S - 0,0065q \quad \text{Eq. 1.14}$$

In cui:

EL = distanza dagli ostacoli laterali (in % rispetto alla larghezza della corsia) ;

G = pendenza media (%);

Lnd = uso del territorio circostante, assume valori appartenenti all'intervallo [0,1];

Lvel = limiti di velocità della strada, con valore compreso fra 70 km/h e 90 km/h;

S = disturbo legato alla presenza di intersezioni; valore compreso fra 0 (nessun accesso) e 4 (presenza di intersezioni a raso semaforizzate);

Considerando il contesto europeo si, può citare lo studio del TRRL, realizzato in Gran Bretagna, in cui si ha (esprimendo la velocità  $v$  in km/h):

---

<sup>1</sup> In tal caso si potrebbe ipotizzare di realizzare delle procedure per sintetizzare tali dati dettagliati in informazioni più sintetiche, utili ai fini della pianificazione.

$$v = 76,5 + 1,1L_c + \frac{1}{60}N - 5\left(\frac{S}{L_0 + 1} + \frac{ND}{L_c \cdot L}\right) - \frac{2}{45}T - \frac{1}{9}I - \frac{2,5}{45}G - \frac{11}{600}q \quad \text{Eq. 1.15}$$

Essendo:

$L$ : lunghezza dell'arco in (km);

$L_c$ : Larghezza della corsia (m);

$L_0$ : distanza dagli ostacoli laterali (m);

$N$ : visibilità laterale calcolata ad intervalli regolari (m);

$ND$ : numero di ingressi laterali da entrambi i lati sull'intero arco;

$T$ : tortuosità (gradi di curvatura/km);

$I$ : somma dei valori assoluti di tutte le pendenze incontrate lungo l'arco (m/km);

$G$ : pendenza netta fra il punto iniziale e quello finale (m/km);

Per quanto riguarda il contesto italiano, invece, la tematica è stata affrontata dal CNR nell'elaborazione delle norme per il calcolo della redditività degli investimenti stradali, riprendendo formulazioni presenti nella normativa francese. In tali formule i valori dei parametri sono legati alla tipologia di strada, seguendo la classificazione delle "norme sulle caratteristiche delle strade extraurbane" (CNR 1983). Tale impostazione introduce delle approssimazioni nel momento in cui, anziché riferirsi alle caratteristiche effettive dell'arco, si fa riferimento ad un andamento medio degli archi di una determinata tipologia.

Le funzioni proposte in un successivo studio ([53]), volto alla determinazione della velocità libera in funzione delle caratteristiche del singolo arco, sulla base delle rilevazioni condotte in campione eterogeneo di 20 strade del Sud Italia, superano questo limite.

L'analisi sperimentale è stata effettuata registrando i passaggi successivi di veicoli che si muovevano con velocità non condizionata<sup>1</sup>, presso due sezioni successive distanti mediamente circa 2 km.

Le caratteristiche ed i valori sperimentalmente rilevati delle variabili esplicative del modello sono riportati in Tabella 1.1.

---

<sup>1</sup> Rilevando un numero di 40 veicoli per strada.



Particolare attenzione è stata posta nel verificare che non vi fosse una netta correlazione fra la tortuosità  $T$  e la possibilità di sorpasso  $N$ . In effetti, la variabile  $N$  esprime la possibilità di mantenere velocità mediamente elevate, effettuando manovre di sorpasso, e quindi è legata alla continuità dei rettilinei in funzione dell'effettuazione di una specifica manovra, a differenza della tortuosità, che non considera come sono distribuiti lungo il corso del tracciato i gradi di curvatura. Si è inoltre constatato come il fatto di trattare in maniera differenziata le pendenze in salita e in discesa non introduceva significativi miglioramenti; pertanto nel modello si considera soltanto il valore assoluto delle differenze di quota. Vennero quindi calibrate tre funzioni lineari, caratterizzate da un numero crescente di variabili considerate, ottenendo:

$$v = 52,03 + 3,63L_S - 0,91G - 0,03T + 5,05L_0 \quad \text{Eq. 1.16}$$

$$v = 52,24 + 3,30L_S - 1,24G - 0,03T + 2,76L_0 + 5,58D \quad \text{Eq. 1.17}$$

$$v = 53,72 + 1,03L_S - 0,84G - 0,03T + 2,56L_0 + 4,4D + 9,86N \quad \text{Eq. 1.18}$$

Dall'analisi comparativa delle tre formulazioni proposte si verifica come il valore di base si mantenga stabilmente poco al di sopra dei 50 km/h e l'introduzione di  $D$  e  $N$  diminuisca l'importanza di  $L_0$  ed  $L_S$ .

**Tabella 1.1 – Variabili esplicative del modello di Nuzzolo-Russo; relativo campo sperimentale di variazione.**

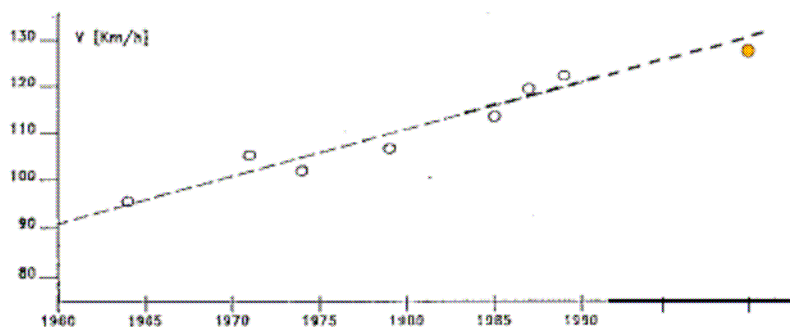
<i>SIMBOLO</i>	<i>NOME</i>	<i>DESCRIZIONE</i>	<i>UNITÁ DI MISURA</i>	<i>CAMPO DI VARIAZIONE</i>
-	COSTANTE DI BASE	-	-	-
$L_S$	LARGHEZZA	Larghezza della carreggiata misurata tra le strisce gialle, diminuita di 5 m	m	0,20÷4,00
$G$	PENDENZA	Valore assoluto del rapporto fra la differenza di quota delle due sezioni estreme e la lunghezza <sup>1</sup>	-	0,00÷7,30
$T$	TORTUOSITÁ	Rapporto fra il numero di gradi di curvatura accumulati lungo il tratto e la lunghezza	Gradi/km	20÷696
$L_0$	DISTANZA OSTACOLI LATERALI	Misurata dalla striscia gialla, se presente	m	0÷2

<sup>1</sup> Espresso come percentuale.

$D$	DISTURBO	0: se vi sono più di un ingresso ogni 200 m, 1: nel caso di maggior distanza	-	0,1
$N$	POSSIBILITÀ DI SORPASSO	0: strade con 1 corsia per senso di marcia prive di rettilinei che consentano il sorpasso; 1: altrimenti;	-	0,1

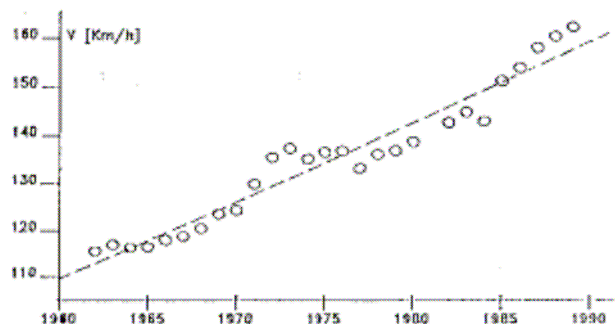
La validità del modello, verificata mediante l'uso di test statistici ed il raffronto con i modelli esteri, ne permette l'applicazione anche in altri contesti, tenendo però conto del campo di variazione delle variabili esplicative presente nei dati sperimentali utilizzati.

Si sottolinea, poi, come le suddette formule esplicitino il contributo della sola componente ambientale. Per quanto concerne la componente umana e veicolare, la cui influenza appare evidente osservando (Figura 1-12) la serie temporale delle velocità in un tratto autostradale con caratteristiche geometrico/funzionali rimaste invariate nel tempo.



**Figura 1-12 – Andamento cronologico delle medie delle velocità a flusso libero rilevate in un tratto autostradale. Fonte: [23]**

L'aumento delle velocità appare facilmente correlabile all'aumento delle prestazioni dei veicoli prodotti, riportato in Figura 1-13.



**Figura 1-13 – Andamento cronologico delle velocità massime dei veicoli venduti. Fonte: [23].**

Tali andamenti costituiscono un elemento di riflessione ulteriore riguardo all'applicabilità dei modelli legata, quindi, non solo alla localizzazione geografica ma anche all'aspetto temporale.

Per quanto concerne il solo aspetto umano, invece, un recente studio ([57]) ha evidenziato l'impatto dell'aspetto motivazionale, esprimibile in termini di motivo dello spostamento e fascia oraria, sulle velocità attuate in diverse strade.

### 1.2.2 Funzioni di costo per condizioni di flusso interrotto

Nel caso in cui non sia trascurabile il perditempo ai nodi la formulazione adottata, come già visto, sarà costituito da due componenti, di cui una relativa al tempo di percorrenza e l'altra connessa al tempo di attesa i nodi:

$$t = T_{RUNNING} + T_{WAITING}$$

Per quanto concerne il tempo di running sono presenti in letteratura relativamente poche formulazioni, relative a contesti urbani, con riferimento esplicito alle caratteristiche degli archi stessi.

Una ricerca condotta a partire da dati sperimentali raccolte nelle aree urbane di città italiane ha portato alla seguente formula per la velocità di running,  $v_r$ :

$$v_r = 30,9 + 2,99L_u - 1,34G - 14,8T^2 - 9,51D - 01,46I + 10^{-3}(-0,06 - 0,109N) \left(\frac{q}{L}\right)^2 \quad \text{Eq. 1.19}$$

In cui oltre ai simboli  $L_u$ , G, T e D, già visti si ha:

$I$  = numero di intersezioni secondarie per unità di lunghezza (km);

$N$  = variabile ombra che assume valore 0 nel caso di strade a senso unico con deflusso su più corsie e uguale ad 1 nel caso di strade con deflusso su una sola corsia;

La deviazione standard,  $DS$ , dei valori misurati è stata anch'essa riferita alle variabili esplicative del modello ottenendo la seguente relazione:

$$DS = 5,48 + 0,56L_u - 0,16G - 3,97T^2 - 0,77D - 0,25I - 70,7 \cdot 10^6 \left(\frac{q}{L}\right)^2 \quad \text{Eq. 1.20}$$

Da cui si deduce il peso delle varie grandezze nel determinare la dispersione dei punti sperimentali: la larghezza  $L_u$  contribuisce fortemente ad aumentarla, mentre la tortuosità T e il numero di intersezioni I la diminuiscono.

Va detto che il campo limitato di variazione dei dati su cui è stato calibrato il modello pone dei limiti alla sua applicabilità e trasferibilità.

Più recentemente è stata realizzata un'altra ricerca che, seguendo la stessa impostazione, era volta in modo specifico all'analisi delle strade dei centri storici. Tale studio, relativo a 17 strade della città di Napoli, si è basato su un insieme di rilevazioni effettuate mediante riprese video e veicoli test equipaggiati con sensori GPS, ed integrate mediante analisi di microsimulazione. L'utilizzo del software di microsimulazione AIMSUN come "laboratori virtuale" ha permesso di estendere i dati su cui effettuare la calibrazione del modello. L'utilizzo del programma di microsimulazione richiede, a sua volta, la calibrazione dei relativi parametri; si osserva, tuttavia, che nel caso specifico, non essendo implicata alcuna scelta di percorso ed essendo i tratti analizzati lontani dalle intersezioni, essa sia risultata relativamente semplificata.

D'altra parte, essendo i dati raccolti relativi a sezioni di rilievo distanti dai nodi, i tempi di percorrenza ottenuti poi sono stati moltiplicati per un termine di correzione  $c(L)$ , funzione della lunghezza dell'arco, al fine di tenere conto delle fasi di accelerazione e decelerazione in prossimità dei nodi:

$$t_r = (L / v_r^i) \cdot c(L) \quad \text{Eq. 1.21}$$

Avendo indicato con  $v_r^i$  la velocità in condizioni "ideali", ossia senza le suddette variazioni legate ai nodi, la quale, in km/h, risulta essere data da:

$$v_r^i = 127,86 + 113,73L_u - 31,68G - 78,89T - 39,88D - 40,26SP + 45,02Pv + \frac{-60,15(q/L_u)^2}{1+T+SP+D} \quad \text{Eq. 1.22}$$

In cui, oltre ai simboli già noti, si ha:

$SP$  : percentuale di strada con presenza di parcheggi laterali;

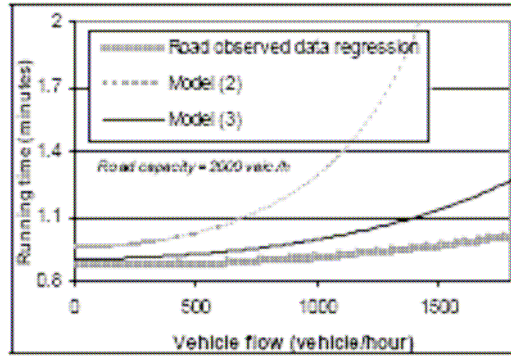
$Pv$  : variabile dummy che assume valore 1 se la strada è asfaltata, 0 altrimenti.

Per il termine correttivo  $c(L)$  è stata trovata la seguente espressione:

$$c(L) = 1 / (1 - \exp(-0,472 - 0,482 \cdot 10^{-2} \cdot L)) \quad \text{Eq. 1.23}$$

In base alla quale si deduce che l'influenza delle fasi di accelerazione/decelerazione diviene trascurabile nel calcolo del tempo di running per archi maggiori di 500 m.

Confrontando i risultati del modello calibrato con quello rappresentato dall'Eq. 1.19, si è verificata una sostanziale somiglianza e coerenza col dato sperimentale per quel che riguarda le velocità a flusso nullo; tuttavia, al crescere del flusso si riscontra una sovrastima dell' Eq. 1.19 rispetto al dato sperimentale, a differenza dell'Eq. 1.21 .



**Figura 1-14 – Confronto fra il modello espresso dall' dell'Eq. 1.12 (3) e quello dell'Eq. 1.19 (2), raffrontati con i dati sperimentali.**

Per quanto riguarda il tempo di waiting, invece, si hanno diverse formulazioni, riferite alle varie tipologie di controllo delle intersezioni, ed una vasta letteratura, cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

In generale, le diverse formulazioni tengono conto di due addendi nel calcolo del tempo di attraversamento  $d$ ; il primo, detto *uniform delay* rappresenta il ritardo che si avrebbe nel caso in cui gli arrivi veicolari fossero distribuiti uniformemente nel tempo; il secondo, detto *incremental delay* quantifica il perditempo aggiuntivo dovuto alla casualità degli arrivi. Ne risulta una struttura comune delle varie formulazioni, esprimibile tramite la relazione di Pollaczek-Khintchine (Lupi, 1985):

$$d = K_1 + K \cdot \frac{\chi}{C \cdot (1 - \chi)} \quad \text{Eq. 1.24}$$

Avendo indicato con  $K$  e  $K_1$  dei parametri che assumono differenti valori nelle diverse formulazioni.

Un'esemplificazione di tale struttura si ha nella formula di Webster (Eq. 1.25), in cui il primo dei due addendi fra parentesi quadrate quantifica l'*uniform delay*, mentre il secondo l'*incremental delay*:

$$d = 0,9 \cdot \left[ (1 - \lambda)^2 + 0,55 \cdot \frac{\chi}{2C \cdot (1 - \chi)} \right] \quad \text{Eq. 1.25}$$

In cui si ha:

- $\lambda = \frac{g}{T_c}$  rapporto fra il tempo di verde effettivo della braccio dell'intersezione considerato rispetto alla durata totale del ciclo  $T_c$ ;

- $C = \lambda \cdot S$  ossia la capacità dell'approccio è pari al prodotto  $S$ , flusso di saturazione, per  $\lambda$  ;

Il fattore 0,9 rappresenta un termine correttivo (che per semplificazione surroga la presenza di un terzo addendo) che permette un miglior accordo con i dati sperimentali.

Un'altra nota formulazione che presenta la struttura della relazione di Pollaczek-Khintchine è quella di Doherty:

$$d = 0,5 \cdot T_c (1 - \lambda)^2 + 0,55 \cdot \frac{\chi}{C \cdot (1 - \chi)} \quad \text{Eq. 1.26}$$

Tali formule presentano il valore che esprime la differenza fra l'effettivo tempo di percorrenza nell'attraversare l'insieme dei due archi separati dall'intersezione e la somma dei relativi tempi di running, che viene detto *approach delay*.

Tale valore, essendo comprensivo del perditempo associati alle fasi di rallentamento e partenza alle intersezioni, risulta maggiore del semplice perditempo in attesa al nodo, detto *stopped delay*<sup>1</sup>. In base a rilievi sperimentali si è ricavata la seguente relazione (Lupi, 1985):

$$\text{approach delay} = \text{stopped delay} \cdot 1,3 \quad \text{Eq. 1.27}$$

Per quanto riguarda l'influenza dei flussi di archi diversi a quello considerato, le funzioni utilizzate risultano separabili allorquando la regolazione semaforica sia tale da escludere le interferenze fra le diverse correnti veicolari.

D'altra parte l'esigenza di conoscere il piani semaforici rappresenta un requisito informativo piuttosto oneroso, nel caso di una rete relativa ad un area vasta. In tal caso può risultare necessario adottare un approccio in cui gli elementi del piano semaforico entrano come variabili nel processo iterativo, ipotizzando una regolazione ottimale o comunque legata ai flussi presenti sui vari approcci incidenti.

L'adeguamento dei parametri di controllo ai flussi rispecchia un procedimento di regolazione che si può ipotizzare avvenga nel lungo periodo nel caso dei sistemi di controllo fisso, mentre risponde alla reale modalità operativa nel caso dei sistemi di controllo attuato da traffico.

---

<sup>1</sup> Si noti, tuttavia che alcune formulazioni del tempo di running sono comprensive dei perditempo legati a decelerazioni/accelerazioni ai nodi ([12]).

Inoltre la necessità di ricorrere a procedimenti iterativi, quali quelli dell'assegnazione dei flussi con una matrice dei costi avente jacobiano asimmetrico è legata alla scelta effettuata nella schematizzazione dell'intersezione.

In fatti nel caso in cui l'intera intersezione venga rappresentata mediante un solo nodo, in cui diviene impossibile distinguere gli effetti delle singole manovre e gruppi di corsie vengono adottate funzioni di tipo separabile, adottando un unico valore di flusso di saturazione, che viene opportunamente ridotto per tener conto delle interferenza fra le manovre. Nel caso di una rappresentazione più dettagliata appare più forte l'esigenza di una modellizzazione con funzioni non separabili. Un livello ulteriore di complessità è presente poi nel caso in cui l'intersezione non sia isolata, ma subisca l'influenza di altre intersezioni a valle, richiedendo in tal caso modalità di simulazione più dettagliate.

Nel caso di intersezioni regolate da precedenza, la modellizzazione viene effettuata sulla base di formule empiriche che risultano, ovviamente, non separabili (HCM, 2000).

In particolare, per le intersezioni a rotatoria si ricordano, fra le altre, le formule proposte dalla FHWA.

Le intersezioni non semaforiche presentano, quindi, una rappresentazione che richiede una maggior complessità di utilizzo e pertanto è stata proposta l'estensione dei procedimenti sviluppati nel caso delle intersezioni semaforizzate, ipotizzando una "fasatura equivalente" che, in particolare per condizioni di congestione, risulti proporzionale ai flussi sui diversi archi ([11]).

### **1.2.3 La modellizzazione delle condizioni di sovrasaturazione**

Come già accennato, il dominio delle funzioni di costo non è limitato superiormente dal valore di capacità al fine di permetterne l'utilizzo in fase di assegnazione. D'altra parte l'instaurarsi di condizioni in cui la domanda d'uso superi la capacità sono piuttosto frequenti nel caso delle intersezioni ed in tali eventualità il tempo di attesa sarà dipendente dall'andamento della domanda di utilizzo.

In tali situazioni, essendo la domanda maggiore del massimo flusso smaltibile si avrà un continuo aumento del numero di veicoli in coda fintantoché, ritornando la domanda a valori inferiori alla capacità, la coda potrà essere smaltita.

La modellizzazione di tali fenomeni richiede, pertanto, l'abbandono dell'ipotesi di stazionarietà pervenendo a formulazioni che considerano un intervallo temporale di riferimento.

Occorre, poi, sottolineare che, in generale, già per valori prossimi alla capacità, per  $\chi > 0,9$ , si verificano condizioni di instabilità che invalidano l'ipotesi di stazionarietà.

Il problema di estendere le funzioni caratterizzate da un limite esplicito di capacità (come ad esempio la funzione di Webster) oltre tale valore risulta risolvibile seguendo due diverse metodologie.

Una prima opzione consiste nell'estendere la funzione mediante la tangente ad essa in un determinato punto, prossimo al valore di capacità, detto "parametro esterno". La pendenza dell'espansione lineare sarà tanto maggiore quanto più il punto scelto risulta vicino al valore di capacità.

Un metodo alternativo, cui si è accennato a proposito della funzione di Davidson, è costituito dal "metodo di trasformazione delle coordinate".

Tale metodo utilizza il modello deterministico di sovrasaturazione che fa riferimento ad un andamento semplificato (Figura 1-15) del processo degli arrivi  $A(t)$  nel tempo, in cui si hanno valori superiori al numero massimo di veicoli che riescono a transitare nell'unità di tempo, corrispondete alla retta  $D(t)$ .

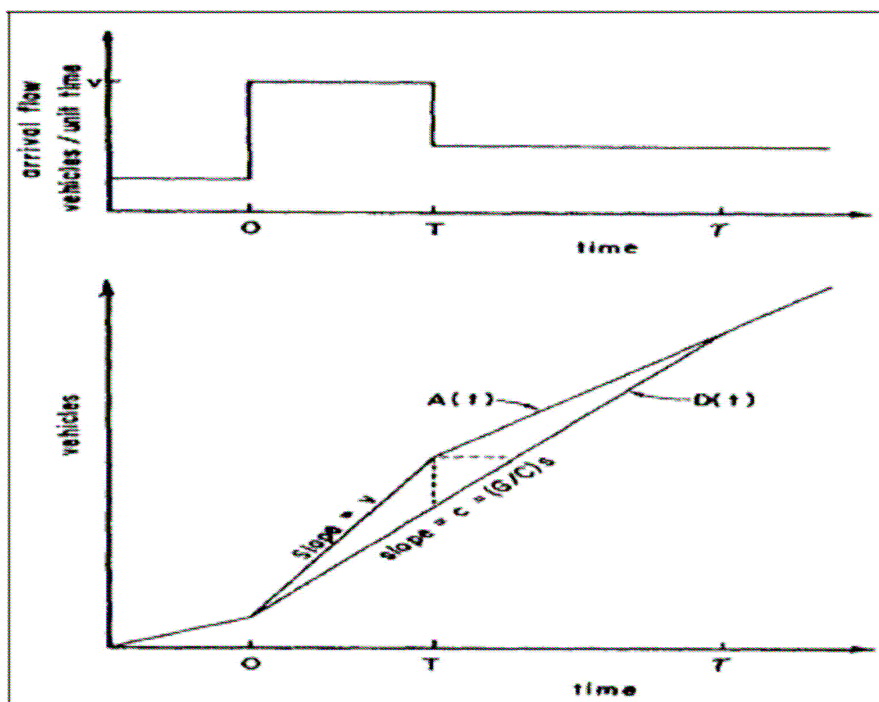


Figura 1-15 – Esempificazione di un picco di domanda di traffico, in cui il processo degli arrivi,  $A(t)$ , presenta valori superiori numero di veicoli che riescono a transitare,  $D(t)$ . Fonte[39].



In tali condizioni il ritardo incrementale da accodamento,  $d_i$ , risulta funzione lineare del grado di saturazione e proporzionale alla durata dell'intervallo di sovrasaturazione:

$$d_i = \frac{T}{2}(\chi - 1) \quad \text{Eq. 1.28}$$

Tale formulazione risulta di tipo deterministico, in quanto nelle condizioni in cui risulta valida, ossia  $\chi > 1,1$  la coda risulta sempre presente. Invece per valori inferiori, anche nell'ambito di un intervallo di sovrasaturazione, si possono avere situazioni temporanee in cui, essendosi momentaneamente smaltita la coda, non viene sfruttata una porzione di una fase di verde.

Ricordando come le formulazioni stazionarie del ritardo incrementale espresse dalla seguente relazione:

$$d_i = \frac{\chi}{C(1-\chi)} \quad \text{Eq. 1.29}$$

risultino valide per  $\chi \leq 0,9$ , il metodo di trasformazione delle coordinate prevede una formulazione che, nel tratto  $0,9 < \chi \leq 1,1$ , raccordi l'Eq. 1.28 con l'Eq. 1.29.

Ricercando l'equazione che rappresentasse il luogo geometrico dei punti equidistanti dalle due formulazioni è stata ottenuta la seguente espressione:

$$d_i = \frac{T}{4} \left( (\chi - 1) + \sqrt{(\chi - 1)^2 + \frac{4\chi}{TC}} \right) \quad \text{Eq. 1.30}$$

In cui sia  $d_i$  che T sono espressi in secondi. Facendo riferimento al caso di arrivi uniformemente distribuiti e di un intervallo T = 15 minuti (ed esprimendo T in ore) si ottiene:

$$t = 0,5 \frac{C(1-\lambda)^2}{1-\lambda \cdot \chi} + 225 \left( (\chi - 1) + \sqrt{(\chi - 1)^2 + \frac{16\chi}{C}} \right) \quad \text{Eq. 1.31}$$

che esprime il valore del tempo di attesa per qualsiasi valore del dominio.

### 1.2.4 Un approccio generale alla modellizzazione del perditempo: la funzione di Akçelik

Una descrizione unitaria del legame fra tempo di percorrenza e flusso veicolare, in grado di trattare in generale condizioni eterogenee di deflusso, sia interrotto che ininterrotto, è stata proposta da Akçelik. Tale trattazione ha superato i limiti insiti nella funzione di Davidson, in cui la valutazione degli incrementi del tempo di percorrenza derivava dall'utilizzo di un modello astratto dalla realtà del fenomeno e basato sulla teoria delle code, attraverso il riferimento esplicito alle caratteristiche degli elementi che determinano tali perditempi. In tal senso il tempo di percorrenza a flusso nullo viene espresso come la somma del tempo di percorrenza e dei perditempo localizzati presso elementi puntuali posti lungo l'arco, come le intersezioni:

$$t_0 = t_f + \sum d_m$$

Ogni elemento andrà computato facendo riferimento alle relative formulazioni specifiche presenti in letteratura.

Viene inoltre definito un parametro di ritardo:

$$J_A = k' = pk$$

che, analogamente al caso precedente, è dato dal prodotto del parametro  $k$ , che è il peso del singolo elemento, per il valore,  $p$ , della densità di tali elementi lungo il percorso (ad esempio il numero di intersezioni per chilometro). Si noti, tuttavia, che in questo caso non viene imposto alcun legame fra  $J_A$  ed il prodotto  $Q \cdot t_0$ .

L'autore, per il parametro  $k$ , ha proposto i valori in Tabella 1.2 per le rispettive tipologie di elementi. Si osserva che tale parametro, generalizzando, viene esteso al caso di archi in cui va quantificare il contributo al perditempo di fenomeni di "disturbo laterale" (quali attraversamenti di pedoni, parcheggi lato strada, attraversamento di aree urbane ecc.) fino ad includere il caso delle autostrade, in cui assume valore minimo di  $J_A = 0,1$ .

**Tabella 1.2 – Valore del parametro  $k$  corrispondenti a diversi tipi di intersezione**

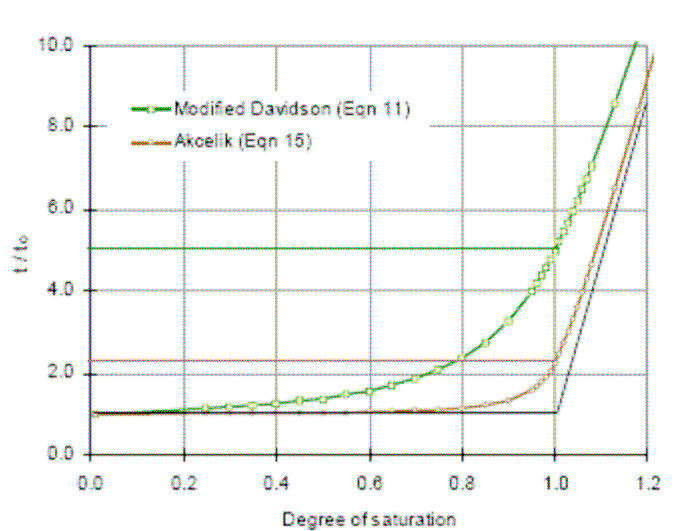
<i>TIPOLOGIA DI INTERSEZIONE</i>	<i>k</i>
Semaforo isolato	0,6
Semaforo coordinato	0,3
Rotatorie e intersezioni a precedenza	1,0

L'espressione dipendente dall'intervallo temporale di riferimento  $T_f$  risulta:

$$t = t_0 \left\{ 1 + 0,25r_f \left[ z + \sqrt{z^2 + \frac{8J_D \chi}{r_f}} \right] \right\} \quad \text{Eq. 1.32}$$

Analoga nella forma e nel significato dei simboli (ad eccezione del parametro di ritardo) alla Eq. 1.10.

Nella Figura 1-16 è riportato l'andamento della funzione di Akçelik, assieme a quello della funzione di Davidson e del modello deterministico di sovrasaturazione. Si notano per condizioni di sovrasaturazione valori minori di perditempo con la funzione di Akçelik rispetto a quella di Davidson che appariva in tal senso eccessivamente penalizzante.



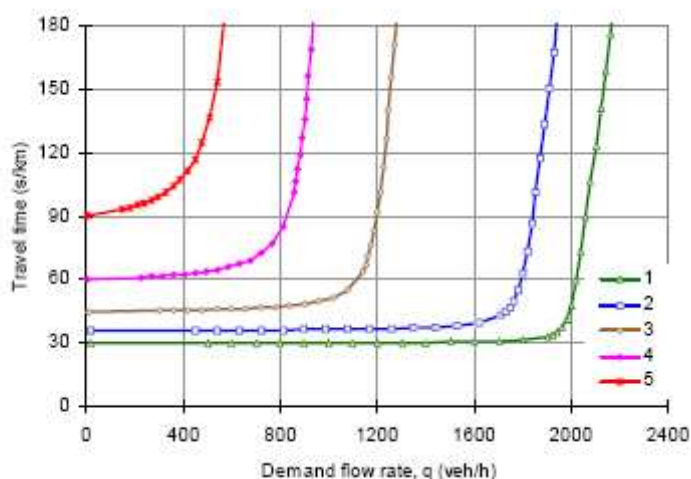
**Figura 1-16– Andamento delle funzione di Akçelik e Davidson (con riferimento ad un intervallo temporale di aggregazione di 1 ora,  $V_0=80\text{km/h}$ ,  $J_D=0,4$ ,  $J_A=0,4$ ) e del modello deterministico di sovrasaturazione. Fonte [2].**

Tale formula richiede, quindi, la definizione dell'andamento della domanda di utilizzo, con l'individuazione di intervalli temporali in cui si possa ipotizzare una distribuzione uniforme. Pertanto i risultati sono fortemente influenzati, in particolar modo in condizione di congestione dall'ampiezza di tali intervalli temporale; l'autore stesso, infatti, consiglia di utilizzare, nella calibrazione del parametro  $J_A$ , punti sperimentali corrispondenti a condizioni di sottosaturazione, in cui tale influenza risulta minore.

L'autore ha proposto dei valori (Tabella 1.3) di riferimento per 5 classi di strade (in cui si indica con  $V_m$  la velocità in corrispondenza ad un valore di flusso pari alla capacità), corripodentemente si ottengono le curve riportate in Figura 1-17.

**Tabella 1.3 – Valori di riferimento per l'utilizzo della funzione di Akçelik per diverse classi di strada**

CLASSE DI STRADA	DESCRIZIONE	$V_0$ [km/h]	$Q$ [veic/h/corsia]	$J_A$	$V_m/V_0$
1	Autostrade	120	2000	0,1	0,63
2	Arterie di traffico (deflusso ininterrotto)	100	1800	0,2	0,57
3	Arterie di traffico (con deflusso interrotto)	80	1200	0,4	0,49
4	Strade Secondarie (con deflusso interrotto)	60	900	0,8	0,44
5	Strade Secondarie (elevato disturbo laterale)	40	600	1,6	0,41



**Figura 1-17 – Andamento della funzione di Akçelik per valori dei parametri di riferimento riferiti alle classi di strade descritte in Tabella 1.3. Fonte: [2].**

In merito all'utilizzo della funzione, l'autore precisò che nell'accoppiare elementi viari di diverso tipo in uno stesso arco si verifica una perdita di accuratezza che deve essere tenuta presente nella valutazione dei risultati, in particolar modo della calibrazione dei parametri.

Nell'unire diverse elementi consecutivi (successione di segmenti) bisognerebbe sommare i relativi tempi di percorrenza a flusso nullo e fare una media pesata dei parametri di ritardo associati a ciascun segmento.

Più problematica risulta la determinazione della capacità che può essere stimata considerando la corsia critica del segmento a capacità minore (collo di bottiglia).

Considerando quanto detto è improbabile che una calibrazione simultanea dei tre parametri in gioco (parametro di ritardo, velocità a flusso nullo e capacità) produca buoni risultati.

Pertanto l'autore consigliò di determinare prima, in modo indipendente i valori di capacità e velocità a flusso nullo e poi calibrare, utilizzando i dati sperimentali, il parametro di ritardo.

### **1.2.5 Modellizzazione di condizioni eterogenee di deflusso**

Nel presente paragrafo vengono presentati alcuni tentativi di modellizzazione di condizioni eterogenee di deflusso aventi carattere essenzialmente empirico. Ne è un esempio l'adattamento dei parametri della funzione BPR al caso di deflusso in arterie semaforizzate, proposto da Skabardonis e Dowling .

Si constata la presenza in letteratura e nella pratica professionale di diversi approcci nella modellizzazione delle funzioni di costo in condizioni caratterizzate dalla compresenza di elementi viari di tipo eterogeneo. In alcuni casi, a differenza di quanto visto la modellizzazione si concentra sulla componente di ritardo alle intersezioni.

Un utile elemento di raffronto è costituito da metodologie e formulazioni presenti nel manuale HCM; verrà fatto cenno ad un interessante contributo metodologico volto ad elaborare, su tale base, delle funzioni di costo "di itinerario".

Un'opzione possibile prevede l'utilizzo di funzioni non separabili; tale approccio richiede una certa complessità sia dell'algoritmo risolutivo sia per quanto concerne i requisiti informativi.

Rimandando alla letteratura per l'approfondimento delle singole modellizzazioni, verranno descritte alcune verifiche sperimentali, come quelle riferite al caso delle Twin Cities in Minnesota ([20]).

### ***1.2.5.1 La funzione BPR nella formulazione proposta da Skabardonis e Dowling***

Le condizioni di traffico presenti nelle arterie di traffico semaforizzate si differenziano nettamente rispetto a quelle in cui venne originariamente calibrata la funzione BPR. Pertanto Skabardonis e Dowling operarono un adattamento della BPR per l'utilizzo in tali contesti. Il procedimento attuato è basato sul confronto con le curve e procedure presenti nel manuale HCM (versione del 1994). Nel calcolo del tempo di percorrenza a flusso nullo viene quindi introdotto un termine legato al ritardo mediamente riscontrato ad un'intersezione semaforizzata caratterizzata da un determinato valore del termine DF, espressivo del coordinamento semaforico e della modalità degli arrivi:

$$D = 0,5 \cdot DF \cdot T_c \left( 1 - \frac{g}{T_c} \right)^2 \quad \text{Eq. 1.33}$$

Ottenendo la seguente espressione per  $T_0$ :

$$T_0 = T_r + \frac{N \cdot D}{3,6} \quad \text{Eq. 1.34}$$

Il raffronto con le curve HCM portò gli autori ad attribuire ad  $\alpha$  un valore di 0,05 e a  $\beta$  di 10. Una verifica con i dati sperimentali e le risultanze di una procedura di microsimulazione (effettuata mediante il software TRANSYT-7F) confermarono la validità del modello, in particolare rispetto alla versione tradizionale della BPR.

### ***1.2.5.2 Rappresentazione unitaria di condizioni eterogenee mediante una sintesi delle modellizzazioni relative ai diversi elementi***

Un approccio interessante è quello proposto in ([11]) in cui si sono delineate le caratteristiche di una funzione di costo “di itinerario”, ossia relativa ad un arco contenente al suo interno nodi secondari da non rappresentare esplicitamente nella schematizzazione. Lo studio parte da formulazioni presenti in letteratura per i diversi elementi proponendo una metodologia (esemplificata nel caso di un arco con un'intersezione semaforizzata) volta ad esprimere il perditempo complessivo nell'arco in funzione di pochi parametri legati ai flussi sugli archi e alle caratteristiche della regolazione semaforica.

Nell'analisi si è partiti dalla modellizzazione dei ritardi fornita dal manuale HCM (versione 1994) per le intersezioni e della versione semplificata della curva proposta in ([30]).

### ***1.2.5.3 Verifiche sperimentali comparative***

Un recente studio (Skabardonis et al. 2006) è stato condotto, nell'area urbana di Los Angeles, in otto differenti arterie di traffico, caratterizzate dalla presenza di intersezioni semaforizzate. Le rilevazioni furono condotte mediante l'utilizzo di veicoli sonda equipaggiati con sensori GPS e integrati da conteggi, effettuati in concomitanza, presso le intersezioni lungo il percorso. La metodologia di conteggio utilizzata non permise di determinare la lunghezza della coda; pertanto fu deciso di ignorare, nello sviluppo dell'analisi, gli intervalli in cui la domanda eccedeva la capacità (per almeno un'intersezione). La fase successiva del lavoro fu finalizzata all'identificazione della migliore forma funzionale per la relazione sperimentale velocità-flusso.

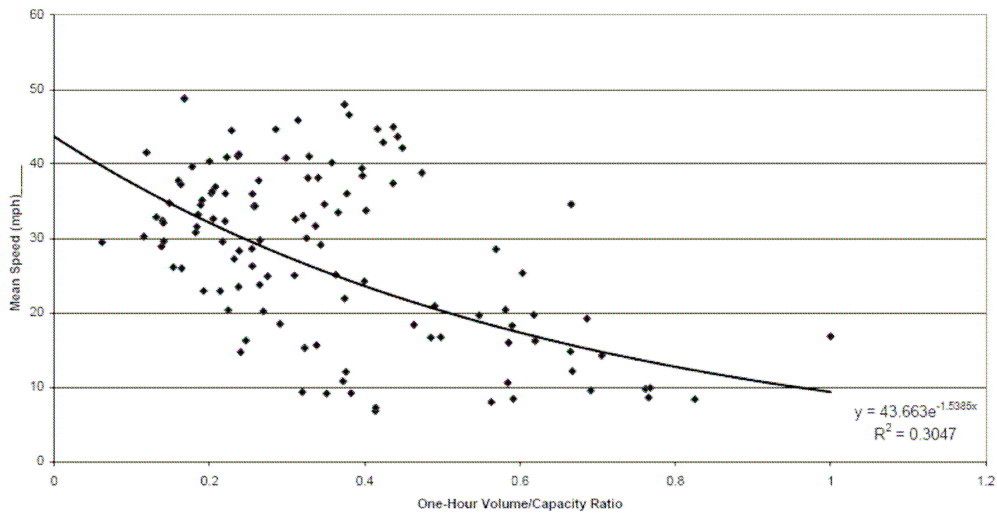
A tale scopo sono state prese in considerazione le seguenti funzioni:

- Esponenziale;
- BPR (considerando sia la BPR nella sua calibrazione originaria, sia quella ottenuta da calibrazione dei dati sperimentali);
- Funzione di Akçelik.

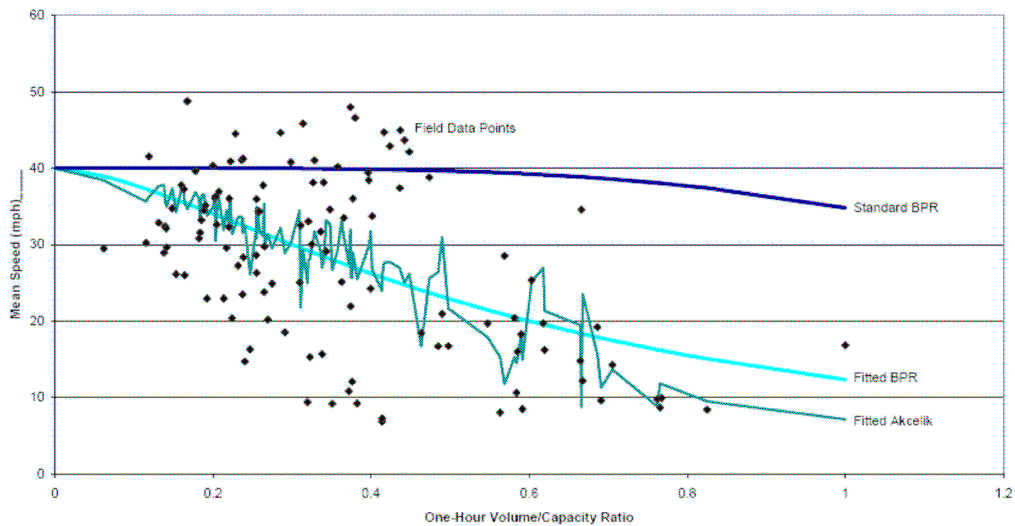
L'analisi dei risultati in condizioni di sottosaturazione, riportati in Figura 1-18 ed in Figura 1-19, evidenzia una grossa dispersione dei dati sperimentali dovuta al fatto che, evidentemente, il tempo di percorrenza è legato ad altri fattori oltre che al grado di saturazione (che spiega solo il 30% circa della varianza dei tempi rilevati), ad esempio differenti sfasature fra i tempi di verde dei diversi semafori.

Si noti come l'andamento della funzione di Akçelik presenti, nella rappresentazione complessiva dei risultati ottenuti nei diversi archi, un andamento altalenante. La ragione di tale andamento è legata al fatto che nella funzione di Akçelik le velocità di percorrenza sono dipendenti dalla lunghezza dell'arco, in maniera tale da ottenere valori di perditempo che ne sono indipendenti.

Il confronto fra i diversi modelli, pur vedendo prevalere la funzione di Akçelik non ha evidenziato grosse differenze, con l'eccezione della BPR non calibrata, caratterizzata da valori di tempo sensibilmente meno corretti. Ciò permette di constatare come la differenza nel risultato sia imputabile all'effettuazione di una calibrazione con i dati relativi al contesto analizzato, più che alla scelta della forma funzionale.



**Figura 1-18 – Calibrazione della funzione esponenziale con i dati di 8 arterie semaforizzate dell'area urbana di Los Angeles. Fonte: [62].**

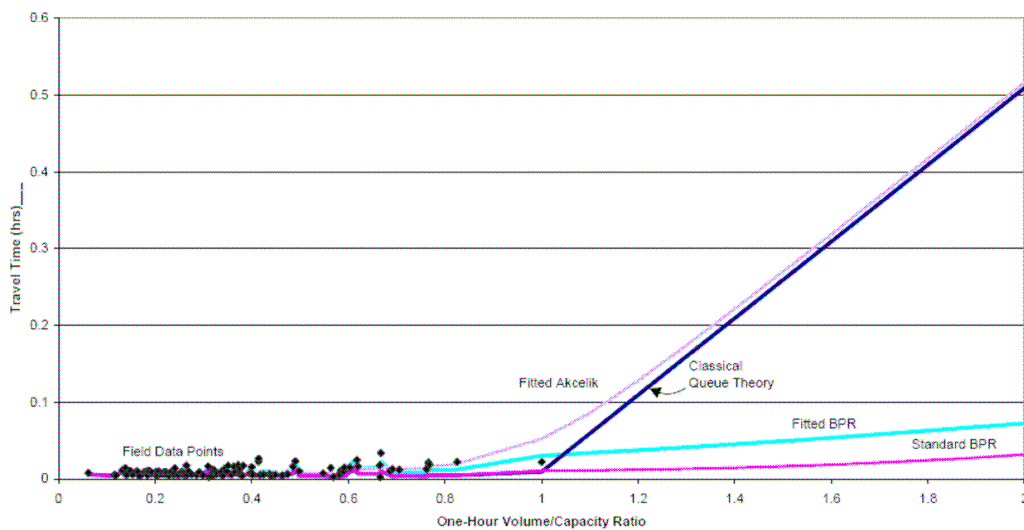


**Figura 1-19 – Calibrazione della funzione BPR e della funzione di Akçelik con i dati di 8 arterie semaforizzate dell'area urbana di Los Angeles. Fonte: [62].**



L'analisi delle condizioni di sovrasaturazione venne limitata ad un confronto col modello deterministico di sovrasaturazione. La funzione di Akçelik risultò essere la più vicina al modello deterministico, come prevedibile dal fatto che essa deriva dalla teoria delle code.

Le altre formulazioni infatti, per valori del grado di saturazione compresi fra 1 e 2, si mantengono su valori di tempo di percorrenza sensibilmente più bassi (tuttavia per valori superiori a 2 la BPR calibrata cresce velocemente superando, a partire da un certo valore, la funzione di Akçelik).



**Figura 1-20 – Andamento delle BPR e della funzione di Akçelik raffrontato al modello deterministico della teoria delle code. Fonte: [62].**

Un'interessante analisi comparativa fra diverse formulazioni, basata su un campione di 50 rilievi (più uno realizzato nell'ambito dello studio pilota), è stata condotta nell'area metropolitana delle Twin Cities nel Minnesota ([20]). In particolare sono state prese in considerazione la funzione BPR, nella sua calibrazione tradizionale e in quella proposta da Skabardonis-Dowling<sup>1</sup>, la funzione di Spiess e il modello di Singapore.

Quest'ultimo modello proposto [73], con riferimento al contesto di Singapore, presenta un'espressione del tempo di percorrenza come somma di un "tempo di running" ed un "tempo di waiting" in cui quest'ultimo corrisponde ad una versione modificata della

<sup>1</sup> In cui il calcolo della velocità libera è basato sui parametri dei cicli semaforici e le modalità di arrivo dei veicoli alle intersezioni.

formula di Webster. Tale modello presenta un forte limite dovuto al fatto che assume valori negativi in condizioni di sovrasaturazione.

L'analisi ha interessato tratti di arterie di traffico comprensivi di un'intersezione semaforizzata. Particolare attenzione è stata rivolta alla scelta della metodologia di rilevazione; fra le tecnologie considerate alcune sono state scartate poiché fornivano informazioni insufficienti o richiedevano una codifica onerosa, come l'analisi di una ripresa dall'alto, seguendo la traiettoria di ogni singolo veicolo. La tecnica del veicolo sonda, presa in considerazione durante la fase pilota, è stata successivamente scartata in quanto richiedeva un numero elevato di transiti per poter ottenere valori significativi. In condizioni di sottosaturazione, infatti, il risultato di ogni singolo transito è fortemente influenzato dalla fase in cui il veicolo test arriva all'intersezione semaforizzata; pertanto era necessario effettuare un numero elevato di passaggi, per poter mediare fra tutte le condizioni possibili. Venne quindi scelto il metodo delle targhe, che prevede l'identificazione del veicolo (registrando in questo caso la porzione costituita dalle ultime tre lettere della relativa targa), nel suo passaggio per due sezioni consecutive. I veicoli rilevati costituivano solo un sottoinsieme fra quelli transitanti. Infatti il valore del tasso di campionamento presentava valori più bassi per i veicoli che si erano dovuti fermare al semaforo (ripartendo poi contemporaneamente allo scattare del verde) a causa della difficoltà di codifica, manuale ed in tempo reale, delle targhe dei veicoli che passavano in rapido susseguirsi.

Per superare tale inconveniente i veicoli rilevati sono stati suddivisi in due gruppi diversi, quello dei veicoli fermatisi al semaforo e quello dei veicoli che vi erano transitati senza interrompere la marcia. Avendo stimato i tempi medi di transito ed il numero di veicoli per ognuno dei due gruppi (ovviamente con riferimento ad ogni singolo intervallo temporale di aggregazione) si può stimare il tempo di transito medio dell'insieme dei veicoli transitati. L'attribuzione dei veicoli transitanti ad una delle due categorie è stata effettuata sulla base di un algoritmo di classificazione basato sul metodo della massima verosimiglianza. I risultati di tale algoritmo sono stati sottoposti a verifica mediante un test di classificazione che utilizza la distribuzione binomiale.

Per confrontare i risultati, si è fatto uso dell'indicatore costituito dall'errore assoluto medio percentuale su  $n$  valori stimati (MAPE: Mean Absolute Percentage Error):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_i - \hat{T}_i|}{T_i} \%$$

in cui  $T_i$  indica il valore rilevato e  $\hat{T}_i$  il corrispondente valore calcolato con il modello.

Innanzitutto sono state prese in considerazione la BPR e le coniche di Spiess utilizzando valori predefiniti<sup>1</sup> per i relativi parametri; i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 1.4. Si osservi che i parametri della BPR sono quelli della calibrazione originaria (in cui tuttavia si era fatto riferimento al valore di capacità pratica).

**Tabella 1.4 Risultati del raffronto delle funzioni non calibrate con i dati sperimentali.**

<i>FUNZIONE</i>	<i>Tipologia di Strada</i>	$\alpha$	$\beta$	<i>MAPE</i>
BPR	tutte	0,15	4	28,7%
CONICA DI	Corsie separate	4	1,167	24,7%
SPIESS	Corsie non separate	5	1,125	

Per quanto riguarda le forme funzionali calibrate, invece, l'analisi è stata condotta considerando un ventaglio di diversi scenari per quanto concerne la disponibilità di dati di input che, se mancanti, vengono sostituiti da valori ipotetici predefiniti.

Nella Tabella 1.5 vengono riportati i risultati relativi ai diversi scenari di utilizzo del modello di Singapore.

**Tabella 1.5 - Errori nei diversi scenari di calibrazione del modello di Singapore.**

<i>Scenario</i>	<i>Grandezze disponibili</i>		<i>MAPE</i>
	<i>Fasatura Semaforica</i>	$V_0$	
1	SÌ	SÌ	6,9 %
2	SÌ	NO	13,2 %
3	NO	SÌ	15,0 %
4	NO	NO	20,4 %

Nella Tabella 1.6 (dove con P si indica la percentuale di veicoli che arrivano nella fase di verde e con S il flusso di saturazione dell'approccio) vengono riportati i risultati relativi ai diversi scenari di utilizzo della BPR adattata da Skabardonis-Dowling.

**Tabella 1.6 - Errori nei diversi scenari di calibrazione della BPR modificata di Skabardonis-Dowling.**

<i>Scenario</i>	<i>Grandezze disponibili</i>				<i>MAPE</i>
	<i>Fasatura Semaforica</i>	$V_0$	<i>S</i>	<i>P</i>	
1	SÌ	SÌ	SÌ	SÌ	6,3 %
2	SÌ	SÌ	NO	SÌ	6,4 %

<sup>1</sup> Ossia valori già presenti nelle precedenti versioni della rete oggetto di studio.

3	SI	SI	NO	NO	6,6 %
4	SI	NO	NO	NO	14,9 %
5	NO	NO	NO	NO	20,6 %

Dall'esame delle tabelle si deduce che informazioni dirette, riferite al caso specifico analizzato, sul tempo di percorrenza a flusso nullo e sulla fasatura semaforica sono, fra quelli considerati, rispettivamente i due più importanti elementi nel calcolo del tempo di percorrenza. La percentuale di arrivi nella fase di verde risulta invece meno rilevante, in quanto, anche se non disponibile, si è ottenuto comunque un valore di MAPE inferiore al 7%. Il calcolo del valor esatto del flusso di saturazione non ha inoltre conseguito un risultato significativo. Confrontando i due modelli, invece, non si osservano differenze sostanziali e pertanto la formulazione di Skabardonis e Dowling appare preferibile, per via della maggior semplicità e per i valori di errore leggermente inferiori. Infine per verificare la trasferibilità di tale formulazione, è stato eseguito un test applicando le stesse funzioni ad archi diversi da quelli della calibrazione (pur appartenendo alla stessa tipologia) ottenendo risultati analoghi ai precedenti.

### ***1.3 La descrizione delle condizioni del deflusso veicolare ai fini della valutazione prestazionale***

In base a quanto visto nei precedenti paragrafi, la valutazione prestazionale degli archi attraverso le funzioni di costo presenti in letteratura si rifà ad approcci in buona parte empirico-induttivi, privi di una modellizzazione del fenomeno basata su di un procedimento rigorosamente deduttivo, con l'eccezione della modellizzazione dei fenomeni di accodamento alle intersezione basata sulla teoria delle code. Le ragioni di tale lacuna sono molteplici: la teoria del deflusso non presenta, in generale, i livelli di accuratezza descrittiva riscontrabili in altri campi (fisica meccanica, termodinamica ecc.). Del resto le difficoltà nello sviluppo di un approccio teoretico alla valutazione prestazione degli archi derivano anche dalle difficoltà legate alla presenza di caratteristiche di eterogeneità ed aleatorietà difficilmente eliminabili, soprattutto nel caso di rappresentazioni aggregate. Si deve constatare come i molteplici elementi di differenziazione e la conseguente complessità del fenomeno riguardino sia le

caratteristiche della corrente veicolare, sia la strada, sia il contesto urbanistico attraversato.

Del resto la schematizzazione astrae dalla realtà del fenomeno ipotizzando condizioni di stazionarietà e la possibilità di schematizzare gli archi della rete come tubi di flusso. Quest'ultima assunzione risulta particolarmente problematica soprattutto in contesti come quelli dell'Area Centrale Veneta, caratterizzata da un'urbanizzazione diffusa: la frammentarietà delle caratteristiche della viabilità secondaria rendono problematica la descrizione del fenomeno sulla base di poche grandezze, peraltro difficilmente reperibili con riferimento a tutti gli elementi della rete. Infatti in una visione a livello macroscopico del deflusso veicolare tali caratteristiche di eterogeneità (interna alle grandezze utilizzate come variabili esplicative) si traducono in componenti significative di varianza non spiegata. D'altra parte l'assunzione di un tale punto di vista risulta necessaria nell'analisi del sistema di trasporto nel suo complesso. Tale considerazione vale in particolar modo nel caso di una modellizzazione a scala regionale e quindi, inevitabilmente, (relativamente) poco dettagliata del fenomeno.

Nonostante le problematiche accennate si constata la presenza in letteratura, soprattutto in tempi recenti, di formulazioni che, partendo da un'analisi dei meccanismi insiti nel fenomeno del deflusso veicolare, risultano relativamente sintetiche e si pongono in alternativa all'approccio induttivo sperimentale.

In ogni caso tali descrizioni, anche se non utilizzate direttamente nelle funzioni di costo possono fornire degli interessanti elementi di raffronto ed un ausilio nell'interpretazione del fenomeno.

Fra tali modellizzazioni si annovera il modello proposto da Van Aerde, basato sul car following, utilizzato da Skardonis e Dowling come termine di paragone nella realizzazione della versione aggiornata della BPR.

In tempi più recenti Wu ha proposto un modello in cui il deflusso veicolare viene in generale suddiviso in tre stati omogenei:

1. deflusso libero (free driving), caratterizzato mediante la velocità libera;
2. deflusso condizionato (bunched driving) , caratterizzato mediante la velocità media del plotone e l'intertempo dei veicoli all'interno del plotone stesso;
3. accodamento (standing), caratterizzato dalla densità massima (jam density);

Ogni situazione di traffico può quindi venire descritta come una combinazione di tali tre stati e pertanto il diagramma fondamentale del deflusso, nelle condizioni di equilibrio,

può essere ottenuto mediante semplici funzioni dei parametri essenziali che descrivono i tre stati.

Seguendo tale impostazione sono state effettuate valutazioni sulla capacità delle strade della viabilità principale e secondaria della rete tedesca (altrimenti difficilmente rilevabili direttamente), verificando quindi la validità del nuovo modello proposto.

Un'approccio analogo è stato seguito da Akçelik che ha di recente approfondito l'analisi sulle modalità in cui si verifica il fenomeno del condizionamento nel deflusso ininterrotto giungendo alla formulazione di un modello che considera gli stati corrispondenti alle diverse regioni del diagramma velocità-flussi; esso prevede la determinazione della proporzione dei veicoli che sono soggetti a condizionamento nella loro marcia e il trattamento esplicito delle interazioni dei veicoli all'interno del plotone, nel caso del moto condizionato.

Queste modellizzazioni sottolineano, tra l'altro, il ruolo del processo degli intertempi nella caratterizzazione del fenomeno del deflusso veicolare.

Si sottolinea quindi l'importanza dell'analisi di tale processo stocastico nella caratterizzazione del fenomeno del deflusso veicolare; tale analisi risulta utile anche al fine di sottoporre a verifica ipotesi che vengono fatte sulla distribuzione degli intertempi in molte modellizzazioni, ad esempio del funzionamento delle intersezioni;

il processo stocastico degli intertempi infine può fornire indicazioni per l'individuazione degli intervalli di stazionarietà ([45]).

## **PARTE 2: SISTEMI INFORMATIVI PER L'ANALISI DEI SISTEMI DI TRASPORTO**

## **2 I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI NELL'ANALISI SPAZIALE E DI RETE**

Nel presente capitolo viene trattato l'argomento dei sistemi informativi, con particolare riferimento ai sistemi informativi geografici. La materia viene affrontata in maniera sintetica con l'obiettivo di fornire un quadro delle molte possibilità offerte dal crescente sviluppo dei sistemi informativi ai fini dell'analisi di un sistema complesso e collocato nel territorio, quale è il sistema dei trasporti. Si rimanda pertanto a testi specialistici per un eventuale approfondimento dei singoli argomenti ([77], [78], [91]).



Nel primo paragrafo vengono presentate le caratteristiche principali e generali delle basi di dati, evidenziando i vantaggi rispetto ad altre tecnologie, con particolare riferimento ai modelli di organizzazione dei dati più evoluti, attualmente ampiamente disponibili (modello relazionale in particolare).

Nel secondo paragrafo vengono presentate le caratteristiche peculiari dei sistemi informativi geografici, i cui dati sono collocati spazialmente nel territorio; successivamente (nel terzo paragrafo) viene presa in considerazione la schematizzazione di tali dati attraverso il modello di rete.

Infine, nel quarto paragrafo viene affrontata la tematica dell'instaurazione della corrispondenza fra dati spaziali mediante algoritmi e operatori spaziali (esigenza presente allorquando si posseggono dati di provenienza eterogenea e non si possa far riferimento ad una relazione già instaurata ed esplicitata tramite una relazione fra campi alfanumerici). Come si vedrà, queste metodologie aprono notevoli possibilità sia per applicazioni innovative (sistemi ITS) sia come supporto alla modellizzazione del sistema dei trasporti.

## **2.1 DBMS: Caratteristiche e funzionalità**

### **2.1.1 Definizione e vantaggi di un DBMS**

Un sistema informativo è costituito da un insieme di risorse umane, strumenti e procedure (manuali o automatizzate) finalizzati all'acquisizione, memorizzazione, elaborazione e scambio di informazioni.

I sistemi informativi, svolgendo un ruolo fondamentale nella organizzazione delle attività complesse, esistono da ben prima dell'avvento dell'informatica e quindi in linea teorica non richiedono necessariamente lo strumento costituito dal calcolatore elettronico. Tuttavia le potenzialità di tali strumenti, unite alla creazione di forme sempre più sistematizzate ed efficaci di codifica dell'informazione, hanno aumentato enormemente le possibilità dei sistemi informativi.

Nei sistemi informatici le informazioni sono presenti come dati, codificati secondo modalità ben definite, che una volta interpretati e correlati possono fornire informazioni, ossia vera e propria conoscenza<sup>1</sup>.

Un approccio nell'archiviazione dell'informazione è fornito dall'utilizzo di file di tipo standard, che memorizzano i dati nella memoria di massa dell'elaboratore. Tuttavia questa opzione fornisce meccanismi non efficienti per quanto concerne le modalità di accesso e condivisione dell'informazione, con la necessità di replicare le informazioni nelle tipologie di file di tutti i programmi che le utilizzano.

Pertanto, al fine di limitare ridondanze e conseguenti possibili incoerenze sono state sviluppate le basi di dati, che gestiscono in modo integrato e flessibile i dati.

Un sistema di gestione di basi di dati (Data Base Management System: DBMS) è infatti un sistema software in grado di gestire collezioni di dati che siano grandi, condivise e persistenti, assicurando loro affidabilità e privacy. Si dice quindi base di dati una collezione di dati gestita da un DBMS.

La condivisione della base dati implica la possibilità, garantita da un meccanismo detto controllo di coerenza, di accesso da parte di diversi utenti ed applicazioni a dati comuni, riducendo la possibilità di ridondanze ed inconsistenze in tali dati.

La persistenza delle basi di dati è basata sul fatto che il loro tempo di vita non è limitato a quello delle singole esecuzioni, a differenza delle comuni applicazioni (create coi linguaggi di programmazione), in cui i dati vengono gestiti nella memoria centrale e cancellati al termine dell'applicazione. Su tale continuità nel tempo si basa il requisito dell'affidabilità, ossia la conservazione del contenuto della base dati perfino in caso di inconvenienti di tipo hardware e software, grazie anche a specifiche funzionalità di salvataggio e ripristino.

Un'ulteriore condizione di sicurezza consiste nella garanzia della privacy dei dati. Infatti l'accesso degli utenti è regolato da meccanismi di autorizzazione, che prevedono l'identificazione di ogni utente e l'attribuzione di specifiche abilitazioni a svolgere operazioni sui dati.

Per organizzare i dati e permetterne l'elaborazione da parte di un calcolatore elettronico si utilizza un insieme di concetti detto modello dei dati.

---

<sup>1</sup> Per la definizione di dato e informazione cfr. [77].

Il modello dei dati fornisce meccanismi di organizzazione dei dati che sono analoghi ai costruttori di tipo<sup>1</sup> dei linguaggi di programmazione, i quali permettono di definire nuovi tipi sulla base di tipi predefiniti (detti elementari) mediante meccanismi detti, appunto, costruttori di tipo.

Attualmente il modello dei dati più diffuso è il modello relazionale, basato sui concetti di tabella e relazione, che verrà presentato nel successivo paragrafo. Tale modello ha soppiantato quelli di tipo gerarchico e reticolare, appartenenti alla prima fase di sviluppo dei DBMS (compresa fra gli anni sessanta e i primi anni settanta del secolo scorso). Il modello ad oggetti, invece, costituisce un'estensione alle basi di dati del paradigma della programmazione ad oggetti e, come si vedrà nel seguito della trattazione, costituisce un'importante evoluzione per particolari tipologie di sistemi informativi.

I modelli dei dati presentati, appartengono alla categoria dei modelli logici, i quali, pur astruendo dalla modalità operativa con cui sono archiviati i dati nella memoria del calcolatore (descritta nei modelli di tipo fisico), descrivono l'organizzazione dei dati mediante particolari strutture logiche (ad alberi, a grafi, a tabelle o ad oggetti). Un livello ulteriore di astrazione è presente invece nei modelli di tipo concettuale, in cui vengono descritti i concetti del mondo reale rappresentati nella base dati, evidenziandone le proprietà e interazioni, a prescindere dalle modalità di archiviazione utilizzate nel calcolatore. Fra quest'ultimi il più diffuso è il modello E-R che prevede l'utilizzo di una serie di costrutti, di cui due sono da considerarsi fondamentali: l'entità e la relazione.

Le entità rappresentano classi di oggetti del mondo reale che presentano proprietà comuni ed un'esistenza "autonoma" nel contesto di interesse. Le relazioni, in tale ambito<sup>2</sup> rappresentano legami logici tra due o più entità. Particolare attenzione viene posta nello specificare la cardinalità delle relazioni, ossia il numero minimo e massimo di occorrenze di relazione a cui una singola occorrenza di entità può partecipare. Le proprietà di interesse di entità e relazioni vengono dette attribuiti.

---

<sup>1</sup> Con tipo di dato, o più semplicemente tipo, si intende un nome cui si associa l'insieme di valori che una variabile, o il risultato di un'espressione, possono assumere e le operazioni che su tali valori si possono effettuare.

<sup>2</sup> Nei testi in lingua inglese in tal senso si utilizza il termine "relationship", per distinguerlo da "relation" utilizzato per indicare di tuple nel modello relazionale.

A tali costrutti vengono associate rappresentazioni grafiche che complessivamente consentono di visualizzare i modelli concettuali attraverso i cosiddetti schemi entità-relazioni (schema E-R).

Una caratteristica fondamentale della strutturazione delle basi di dati è costituita pertanto dalla indipendenza dei dati, ossia dalla possibilità di interagire con la base di dati prescindendo dai dettagli e modalità di implementazione. Ciò è reso possibile attraverso una strutturazione su diversi livelli interagenti, ma distinti (schema logico, schema interno, schema esterno), che possono essere modificati separatamente. In tal modo è possibile ad esempio cambiare le strutture fisiche di memorizzazione, senza modificare la presentazione dei dati all'esterno della base di dati e quindi influire sui programmi che vi interagiscono.

La strutturazione della base dati assume inoltre particolare rilievo in quanto componente invariante nel tempo e viene denominata schema della base dati. In tal modo viene distinta dalla componente variabile nel tempo, costituita dai valori effettivi presenti, ossia l'istanza o stato della base dati.

### **2.1.2 Il modello relazionale**

Il modello relazionale struttura la base di dati come una collezione di relazioni.

La nozione di relazione è stata sviluppata a partire da concetti matematici, in particolare dalla teoria degli insiemi, per rappresentare un sottoinsieme del prodotto cartesiano fra due o più domini. Tale concetto formalmente rigoroso viene reso in maniera immediata ed intuitiva grazie alla nozione di tabella.

Il concetto di relazione infatti si esplica, nel contesto del modello dei dati relazionale, attraverso una tabella caratterizzata da un numero fisso di colonne (dette attributi o anche campi) e un numero variabile di righe (dette tuple, ennuple o record). I valori presenti in una stessa colonna devono appartenere ad uno stesso dominio, ossia ad uno stesso insieme predefinito di valori (limitato o illimitato).

Si definiscono inoltre “grado” di una relazione il numero delle colonne presenti e “cardinalità” il numero di righe.

Una sostanziale differenza rispetto al concetto tradizionale di relazione matematica, ossia un insieme di ennuple ordinate, è costituita dal fatto che nel modello relazionale gli elementi dell’ennupla sono individuati sulla base del nome delle colonne, ossia degli attributi, e non della posizione. Pertanto, in quest’ultimo caso, due tabelle con le stesse righe, ma in ordine diverso, rappresentano la medesima relazione.

In tal senso il modello relazionale risulta essere “basato sui valori”, a differenza di quelli reticolare e gerarchico che, essendo “basati su record e puntatori”, non permettono di svincolare la modellizzazione a livello logico dalle archiviazione dei dati a livello fisico.

Un aspetto problematico del modello relazionale è costituito dal fatto che richiede una struttura rigida delle ennuple di dati, che devono essere fra loro omogenee all’interno di una stessa relazione.

Tuttavia in alcuni casi non saranno disponibili i dati di alcuni campi di qualche ennupla. Pertanto, per rappresentare in maniera semplice e corretta l’assenza di informazione, devono essere introdotti valori speciali, detti nulli, che costituiscono valori aggiuntivi rispetto ai domini e sono ben distinti da essi, al fine di evitare ambiguità (ad esempio confondendo col valore numerico zero).

Inoltre, anche in presenza di valori non nulli, un qualsiasi insieme di ennuple non rappresenta sempre un’informazione corretta e accettabile. Pertanto, nella base di dati vengono inseriti dei vincoli di integrità, ossia delle proprietà che devono essere soddisfatte dalle istanze della base dati stessa al fine di rappresentare informazioni corrette.

Tali vincoli possono essere classificati in base agli elementi della base dati che coinvolgono. In tal senso, un vincolo si dice intrarelazionale se riguarda singole relazioni della base dati, mentre se coinvolge più relazioni viene detto interrelazionale.

Un caso particolare di vincolo intrarelazionale è costituito dai vincoli di tupla, in cui la condizione deve essere verificata sulla singola tupla, analizzata separatamente dalle altre. Talvolta la condizione riguarda un solo campo e definisce pertanto un vincolo sui valori (detto anche vincolo di dominio).

Fra i vari tipi di vincolo, quello che assume maggior importanza è costituito dal vincolo (intrarelazionale) di chiave. Tale vincolo descrive un insieme di attributi i cui valori devono identificare univocamente le singole ennuple della relazione.

Quindi il vincolo di chiave permette di garantire l'accessibilità e l'identificazione di tutti i valori della base dati. Inoltre permette di instaurare in maniera efficace le corrispondenze fra diverse tabelle della base dati. Tali corrispondenze, fondamentali nel processo di estrazione delle informazioni dai dati, sono inoltre garantite dai vincoli interrelazionali. Fra essi i più importanti sono i vincoli di integrità referenziale, i quali prevedono che i dati presenti in relazioni diverse siano correlati attraverso valori comuni, che sono solitamente i valori delle chiavi primarie (di almeno una delle relazioni coinvolte).

Per poter operare su una base di dati è necessario innanzitutto definirla, per mezzo di un linguaggio che consenta di descrivere al calcolatore il suo schema detto DDL (Data Definition Language); successivamente la base di dati deve essere "popolata", ossia si devono inserire delle tuple nelle relazioni.

In seguito è possibile estrarre informazioni dai dati inseriti attraverso una serie di operazioni, che hanno trovato formalizzazione nell'algebra relazionale e attuazione grazie ai linguaggi di interrogazione o DML (Data Manipulation Language).

L'algebra relazionale definisce una serie di operatori che vengono applicati a relazioni, dette operandi, e producono come risultato una relazione.

Gli operatori si suddividono in unari e binari a seconda che siano applicati, rispettivamente, ad una o due relazioni.

I principali operatori unari sono quello di selezione e quello di proiezione. La selezione consiste nel costruire una relazione in cui sono presenti le tuple della relazione di partenza che soddisfano il predicato di selezione, costituito da una condizione da verificare sul valore degli attributi della tupla. Il predicato di proiezione, invece, costruisce una relazione che comprende un sottoinsieme degli attributi della relazione originaria. Pertanto, generalmente, una selezione produce una relazione che ha cardinalità minore del suo operando, mentre una proiezione produce una relazione che ha grado inferiore del suo operando.

Fra gli operatori binari ve ne sono alcuni che mutuano le operazioni tradizionali sugli insiemi: unione, intersezione e differenza.

Di carattere più peculiare risulta invece l'operazione binaria di join, che consente di ottenere una relazione in cui vengono concatenate le tuple degli operandi.

La correlazione delle tuple può essere basata su valori uguali di attributi dello stesso nome (join naturale), oppure per mezzo di una selezione operata sul prodotto cartesiano degli operandi (theta-join). Quest'ultimo caso presenta maggior importanza ai fini dell'utilizzo pratico, specialmente qualora la selezione comporti la verifica dell'uguaglianza fra un attributo della primo e del secondo degli operandi (equi-join).

Con riferimento al caso dell'equi-join, quando uno dei due attributi è chiave (cioè è univoco) si parla di "relazione uno-a-molti"<sup>1</sup>; se lo sono entrambi, si parla di "relazione uno-a-uno".

La corrispondenza fra le tuple di due tabelle può riguardare tutte o solo alcune delle tuple. Nel caso in cui si considerino nel risultato finale solo le tuple in cui si ha corrispondenza fra le due tabelle di partenza, il join verrà detto "interno".

Nel caso contrario, ossia allorquando tutte le tuple contribuiscono al risultato finale, il join viene detto "esterno", eventualmente estendendo con valori nulli ove non siano presenti i valori corrispondenti nell'altro operando. Più in dettaglio, il join esterno verrà detto "sinistro" se estende solo le tuple del primo operando, "destro" se estende solo le tuple del secondo operando e "completo" se estende tutte le tuple.

L'esigenza di mettere a disposizione degli utenti (nel livello esterno) diverse rappresentazioni dei dati e le possibilità offerte dall'operazione di join portano alla realizzazione delle relazioni derivate, il cui contenuto è funzione di altre relazioni, dette relazioni di base. Usualmente le relazioni derivate vengono indicate col termine "viste", mentre si designano come "tabelle" le relazioni di base.

A loro volte, le viste si suddividono in "relazioni virtuali" (dette anche semplicemente viste) e "viste materializzate". Le prime sono definite solo in termini di funzioni non memorizzate nella base dati, ma ottenibili dinamicamente in seguito ad interrogazione. Nel secondo caso invece le relazioni derivate vengono memorizzate direttamente nella base dati. Operativamente l'onerosa necessità di mantenere l'allineamento con le relazioni di base ha limitato lo sviluppo dell'utilizzo di viste materializzate.

---

<sup>1</sup> Il termine relazione in tal caso è utilizzato nel senso di corrispondenza fra diverse tabelle, con significato analogo quindi a quanto visto in tema di modello concettuale Entità-Relazioni.

Il complesso delle operazioni di DDL e DML è reso disponibile all'utente tramite i comandi del linguaggio SQL, che costituisce il linguaggio di riferimento per l'interazione con i DBMS relazionali.

Tale linguaggio è stato oggetto di un continuo processo di standardizzazione, le cui tappe fondamentali sono riassunte in Figura 2-1 (si devono constatare delle piccole differenze di implementazione in diversi software, soprattutto laddove la standardizzazione non è avvenuta tempestivamente).

Nome informale	Nome ufficiale	Caratteristiche
SQL base	SQL-86	Costrutti base
	SQL-89	Integrità referenziale
SQL-2	SQL-92	Modello relazionale Vari costrutti nuovi 3 livelli: entry, intermediate, full
SQL-3	SQL:1999	Modello relazionale a oggetti Organizzato in diverse parti Trigger, Funzioni esterne, ...
	SQL:2003	Estensioni del modello a oggetti Eliminazione di costrutti non usati Nuove parti: SQL/JRT, SQL/XML, ...

Figura 2-1 –Fasi successive del processo di standardizzazione del linguaggio SQL. Fonte:[77].

### 2.1.3 Le basi di dati a oggetti

Le basi dati a oggetti integrano la tecnologie delle basi dati con il paradigma a oggetti, sviluppatosi nell'ambito dei linguaggi di programmazione.

La programmazione orientata agli oggetti (OOP, Object Oriented Programming) è un paradigma di programmazione che prevede di raggruppare in un'unica entità, detta classe, sia le strutture dati che le procedure che operano su di esse.

In fase di esecuzione del programma viene quindi creato un "oggetto" software, che della classe costituisce un'istanziamento (ossia una particolare realizzazione) ed è dotato di proprietà (dati) e metodi (procedure) che operano sui dati dell'oggetto stesso.



L'interazione con un oggetto non avviene quindi per mezzo della manipolazione diretta degli attributi di un certo dato, ma solo attraverso le operazioni consentite dall'oggetto a cui il dato appartiene e definite al suo interno. L'implementazione di una operazione è specificata all'interno di un oggetto perché solo da quella posizione è possibile accedere agli attributi privati dell'oggetto stesso (incapsulamento). Questa definizione del comportamento dell'oggetto attraverso una strutturazione interna inaccessibile all'utente, oltre a garantire la sua intangibilità, permette di svincolarne l'utilizzo dalla conoscenza del meccanismo interno di funzionamento.

Si osservi come la programmazione OOP sia ispirata al modo con cui interagiamo con gli oggetti nel mondo. Ad esempio, possiamo compiere una stessa operazione, come schiacciare un pulsante, per accendere dispositivi di vario tipo. Per poter interagire con questi oggetti non è necessario sapere i dettagli di come avviene l'accensione (si pensi a tutte le operazioni necessarie all'accensione di un computer che sono per lo più ignorate dall'utente).

Pertanto la realizzazione di un programma, nell'approccio ad oggetti, consiste nella realizzazione di interazioni fra le classi, alcune già presenti in librerie altre realizzate appositamente, mediante un'ottica di modularizzazione e di riutilizzo.

A tale scopo l'OOP prevede un meccanismo molto importante, l'ereditarietà, che permette di derivare nuove classi a partire da classi già definite. L'ereditarietà consente di aggiungere membri ad una classe, e di modificare il comportamento dei metodi, in modo da adattarli alla nuova struttura della classe.

Esiste inoltre la possibilità, detta polimorfismo, che le classi derivate implementino in modo differente i metodi e le proprietà delle classi da cui derivano. In tal modo è possibile che gli oggetti appartenenti a delle sottoclassi di una stessa classe rispondano diversamente alle stesse istruzioni.

Tali proprietà, permettendo un gestione efficiente, sicura e flessibile del processo di sviluppo del software hanno determinato la diffusione e l'affermazione dei linguaggi di tipo OOP (come C++, Java, C#, Visual Basic.NET).

Analogamente nel campo dei DBMS un database orientato agli oggetti differisce dagli altri modelli elencati per il fatto che in questo tipo di database gli oggetti memorizzati contengono, oltre ai dati, anche delle informazioni sulle operazioni possibili. Gli altri modelli invece sono solo dei contenitori di dati, e per manipolarli bisogna necessariamente ricorrere ad applicazioni esterne al database stesso.

I database ad oggetti sono particolarmente indicati per le applicazioni che richiedono dati complessi, come ad esempio immagini o suoni, per le quali il modello relazionale si è dimostrato inadeguato.

Nelle basi dati ad oggetti ogni entità del mondo reale è rappresentata da un oggetto.

Esempi di oggetti possono essere:

- Componenti elettronici, progettati tramite un sistema di Computer\_Aided Design (CAD);
- Componenti meccanici, progettati tramite un sistema di Computer\_Aided Manufacturing (CAM);
- Specifiche e programmi, gestiti da un ambiente di Computer\_Aided Software Engineering (CASE);
- Dati multimediali, che comprendono testi liberi, immagini, suoni, collezionati tramite sistemi per la gestione di documenti multimediali;
- Dati spaziali o geografici, che descrivono ad esempio figure geometriche o mappe geografiche, gestiti dai sistemi informativi geografici (GIS) .

In tutti questi casi, pur eterogenei, è presente la comune esigenza di organizzare i dati come oggetti complessi ed unitari, mentre nel modello relazionale ogni oggetto si trova distribuito su un numero (anche alto) di tabelle, richiedendo per una visione unitaria dello stesso l'effettuazione di query, a volte, piuttosto complesse.

Una delle maggiori difficoltà che ha ostacolato l'affermazione del modello a oggetti nell'ambito dei DBMS è costituito dalla mancanza di un modello per gli oggetti universalmente accettato e di un linguaggio di interrogazione standard.

Per colmare tale lacuna il consorzio che raggruppa i principali realizzatori di OODBMS (Object-Oriented Database Management System) ha realizzato un modello dei dati con relativo linguaggio di definizione (ODL), e di interrogazione (OQL) al fine di garantire l'interoperabilità fra i diversi sistemi.

Nell'ambito dello sviluppo delle basi a oggetti si sono manifestati due differenti approcci. Un primo approccio, più rivoluzionario, è quello delle basi dati orientate a oggetti, e sostanzialmente sviluppa i DBMS come un'estensione delle caratteristiche dei linguaggi di programmazione a oggetti.

I sistemi "relazionali a oggetti" (Object-Relational Database Management System, ORDBMS) presentano un approccio più evolutivo, integrando il concetto di oggetto all'interno del modello relazionale.

## **2.1.4 Le funzionalità (avanzate) di un moderno DBMS**

I vantaggi di un sistema DBMS, accennati in precedenza, oggi giorno vengono realizzati attraverso funzionalità di crescente potenzialità, le cui caratteristiche salienti vengono descritte nel seguito.

### ***2.1.4.1 Database temporale***

La dimensione temporale caratterizza un'ampia casistica di sistemi informativi che non è sempre trattata in maniera adeguata ed efficiente con i database di tipo comune. A tale scopo sono stati sviluppati i database temporali, nei quali vengono considerate diverse dimensioni temporali del dato, come ad esempio la sua validità nel tempo.

Normalmente il dato viene registrato come valido nell'istante attuale, senza tener traccia o esplicitare lo stato futuro e/o passato. Invece, assegnando un valore rappresentativo di un intervallo temporale, diviene possibile registrare lo stato dei dati del sistema informativo con la loro evoluzione nel tempo.

Per un approfondimento dell'argomento si rimanda a testi specifici sull'argomento (ad esempio [104])

### ***2.1.4.2 Basi Dati Attive***

Una base di dati si dice attiva quando possiede un sottosistema integrato per definire e gestire regole che agiscono sulla base dati sul base del paradigma Evento-Condizione-Azione. Tale paradigma prevede che la regola reagisca ad alcuni eventi (che corrispondono generalmente ad una modifica della base dati), valutando il valore di verità di una predeterminata condizione. In base al risultato di tale valutazione, viene eseguita o meno una azione prestabilita.

In tal modo il comportamento della base dati viene ad essere di tipo reattivo, con un alternarsi, gestito tramite un sottosistema autonomo detto processore delle regole (rule engine), tra esecuzioni delle transazioni, lanciate dagli utenti, e delle regole, lanciate dal sistema.

Tali regole possono venire impostate per gestire un ampia gamma di situazioni e operazioni, garantendo la correttezza e coerenza dei dati presenti nel DBMS. Ad

esempio possono essere utilizzate per garantire vincoli di integrità complessi fra diverse tabelle, gestire eccezioni, implementare regole aziendali.

Tali funzionalità aggiungono una nuova dimensione alla indipendenza delle basi dati, di cui s'è detto in precedenza. Si parla in tal caso di "indipendenza della conoscenza", in quanto la conoscenza viene implementata nelle regole, anziché nel programma applicativo. In tal modo si ottiene anche il vantaggio che tale implementazione deve essere effettuata una sola volta (a livello di DDL) per essere poi condivisa da tutte le applicazioni che si interfacciano col DBMS, con evidente semplificazione.

Quasi tutti gli attuali DBMS relazionali possiedono le caratteristiche delle basi dati attive, mettendo a disposizione la possibilità di implementare semplici regole, dette trigger. Tuttavia va sottolineato come, a causa del lungo tempo intercorso fra la comparsa di tali funzionalità e loro standardizzazione, il processo di uniformazione e conformazione allo standard (SQL-3) non è stato ancora portato a compimento.

#### ***2.1.4.3 Architettura centralizzata a più livelli (separazione dati e applicazione)***

Il sistema informativo, come s'è detto, comporta una gestione unitaria delle informazioni. Tuttavia tali informazioni devono poter essere rese accessibili ad una pluralità di utenze, con diverse modalità di accesso al sistema informativo. Lo schema classico di questa interazione fra diversi processi informatici è costituito dall'architettura client-server.

Tale architettura prevede infatti l'interazione fra processi che richiedono servizi, detti client, e processi che offrono servizi, detti server. Perlopiù il client si interfaccia inoltre direttamente con l'utente finale e, sulla base degli input provenienti da quest'ultimo, genera le richieste al server. Quest'ultimo svolge quindi un compito reattivo, determinato dalle richieste che riceve dal client.

Solitamente il singolo client effettua un numero contenuto di richieste verso uno o più server (generalmente comunque pochi e comunque solo nel caso delle cosiddette basi dati distribuite), mentre il server deve rispondere a richieste provenienti da vari client.

La distinzione fra client e server corrisponde in origine anche ad una distinzione fra diverse macchine in cui avvengono i rispettivi processi; tuttavia, trattandosi di un paradigma che norma essenzialmente la realizzazione del software, non è necessario che corrisponda ad una distinzione in termini anche di hardware.

In definitiva il paradigma client-server garantisce un'accesso plurimo alla base dati, realizzando una separazione del dato dall'applicazione. In tal modo la base dati viene resa disponibile ai diversi software applicativi, regolando l'effettuazione delle modifiche, realizzate da diversi punti di accesso al sistema informativo, e garantendo la coerenza dei dati.

#### ***2.1.4.4 Sistemi informativi su Web***

La rapida espansione di Internet, che ha assunto carattere di universalità, ha caratterizzato lo sviluppo dell'informatica negli ultimi anni. La diffusione dei relativi strumenti e protocolli è inoltre accresciuta dal fatto vengono sempre di più adottati anche nell'ambito di reti private, dette Intranet.

Tale espansione è stata accompagnata anche da un mutamento del Web, che è diventato sempre di più una piattaforma per lo sviluppo di sistemi informativi di vario tipo, accessibili mediante browser.

Va precisato che i sistemi informativi su Web, pur potendo usufruire di strumenti e modelli sviluppati per i sistemi informativi tradizionali, sono caratterizzati da aspetti peculiari piuttosto rilevanti.

Infatti le tipologie di dati presenti sono molto varie e spesso caratterizzate da struttura irregolare. Da ciò nasce, tra l'altro, l'esigenza di realizzare un sistema di rappresentazione per dati semistrutturati come XML, di cui si dirà nel paragrafo seguente.

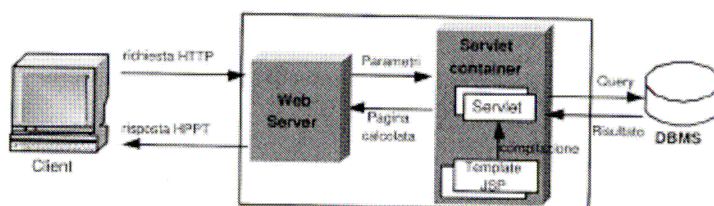
Per quanto riguarda l'utilizzo, invece, si devono prevedere modalità di accesso ai dati piuttosto eterogenee, finalizzate principalmente alla consultazione anziché all'aggiornamento.

In ragione di queste differenze e della generale maggiore complessità delle applicazioni, l'architettura di un sistema informativo su Web richiede una strutturazione maggiormente articolata rispetto al caso tradizionale.

L'architettura client/server descritta in precedenza si arricchisce così di un Server Web, che assolve il compito di gestire le richieste degli utenti inviate tramite client web (ossia uno dei comuni navigatori per Internet come Microsoft Internet Explorer o Mozilla

Firefox), inviarle al server centrale, ottenere una risposta e restituire le informazioni risultanti all'utente finale.

Tale architettura su tre livelli è stata realizzata con tecnologie di recente potenzialità, che permettono di costruire dinamicamente le pagine Web quali: Common Gateway Interface (CGI), Java servlet e Java Server Pages (JSP). Recentemente è stato introdotto anche un ulteriore elemento, l'Application Server (finalizzato ad un incremento delle prestazioni e scalabilità attraverso un ottica di riutilizzo delle componenti software), giungendo a definire una vera e propria architettura multilivello.



**Figura 2-2 – Esempio di architettura a tre livelli di un sistema informativo su Web realizzata on JSP. Fonte:[78].**

#### **2.1.4.5 Basi di dati e XML**

La recente realizzazione dello standard XML (eXtensible Markup Language), sviluppato per lo scambio di informazioni sul Web, ha rappresentato un'interessante evoluzione nel campo dei modelli dei dati. Tale standard presenta un insieme di regole sintattiche per descrivere, mediante una sintassi basata sui marcatori (come HTML), la struttura di documenti e dati presenti nel caso di documenti di tipo generico.

La versatilità di XML ne consente l'utilizzo, oltre che nella rappresentazione di documenti, anche nella realizzazione di basi di dati, essendo, tra l'altro, dotato di linguaggi di DDL e DML.

Inoltre si tratta di un formato che agevola l'interscambio di informazioni fra diverse piattaforme, in quanto fornisce una descrizione del contenuto informativo indipendente dalla piattaforma hardware/software.

Tuttavia, per permettere un utilizzo di XML nella archiviazione di dati complessi, occorre integrarlo con le funzionalità tipiche dei sistemi DBMS.

A tale scopo sono state sviluppate specifiche estensioni del modelli relazionale e ad oggetti per i dati XML. Un altro approccio, invece, ha portato alla creazione di basi dati XML native, ossia concepite espressamente per dati XML.

### **2.1.5 Rassegna storica dei software DBMS**

L'esigenza di strumenti per la gestione delle basi di dati è stata presente fin dagli albori dell'informatica. Tuttavia solo dagli anni settanta del secolo scorso, grazie allo sviluppo del modello relazionale ideato da E. Codd ([1]) si pervenne alla realizzazione di efficienti DMBS. Tali DBMS erano realizzati per un utilizzo su computer mainframe<sup>1</sup>, e fra i primi si annoverano System R dell' IBM e INGRES sviluppato dall'Università della California di Berkeley. Successivamente si imposero Oracle dell'Oracle Corporation e DB2 dell'IBM.

L'espansione dell'utilizzo dei personal computer, a partire dalla metà degli anni ottanta, portò alla realizzazione di DBMS ad essi dedicati quali dBase e Paradox e, in tempi più recenti, Microsoft Access.

Negli anni novanta le crescenti esigenze di scambio dati fra PC, portarono all'adozione diffusa del modello client/server, in particolare in prodotti come Oracle Database e SQL Server della Microsoft. Infine L'avvento di Internet ha comportato la realizzazione di prodotti in cui la Rete costituisce l'ambiente di riferimento per il sistema informativo, con lo sviluppo di molteplici possibilità, quali ad esempio quelle offerte dal grid computing<sup>2</sup> (applicato in Oracle 10g).

Attualmente il mercato dei DBMS comprende un ampio ventaglio di prodotti con notevoli differenze in termini di funzionalità e costi. Si osserva infatti come molti prodotti offrano solo alcune delle funzionalità dei moderni database e presentino una adozione degli standard soltanto parziale. Per quanto riguarda i costi si constata la presenza anche di alcuni prodotti gratuiti, ossia distribuiti secondo le specifiche di

---

<sup>1</sup> Il termine "mainframe" risale agli albori dell'informatica ed indicava complessi sistemi hardware che contenevano il processore centrale e il numerosi dispositivi di ingresso/uscita. Nel seguito il termine fu usato per distinguere gli elaboratori di alta fascia, caratterizzati da alte prestazioni e notevole affidabilità nella gestione di grandi moli di dati.

<sup>2</sup> La tecnologia "grid computing" consente un'accesso immediato e scalabile ad rete distribuita di computer differenti, in maniera tale da effettuare una gestione condivisa delle risorse di calcolo e dell'accesso ai dati.

licenze che regolano il rilascio del software libero, tra cui MySQL e PostgreSQL (che costituisce un'evoluzione del già citato Ingres)

Attualmente Oracle primeggia fra i DBMS più diffusi a livello globale ([37]) ed offre notevoli possibilità in termini di automazione delle attività amministrative, funzionalità di sicurezza, compatibilità con le normative, presenza di caratteristiche avanzate dei DBMS descritte nei precedenti paragrafi.

## **2.2 DBMS spaziali e GIS**

### **2.2.1 Basi di dati spaziali**

I dati spaziali descrivono l'informazione presente in uno spazio a  $n$  dimensioni, ad esempio una mappa geografica (bi-dimensionale) o il progetto di un edificio (tri-dimensionale).

Un sistema informativo spaziale (Spatial Database System: SDS), permette l'archiviazione e rappresentazione dei dati spaziali, associandovi anche dati alfanumerici.

Tali basi dati permettono di descrivere la disposizione dei dati nello spazio, associandovi un oggetto geometrico appartenente ad una determinata tipologia (punto, linea, area ecc.). A tale oggetti (componenti spaziali) sono quindi associate le altre informazioni di tipo alfanumerico (attributi descrittivi), che descrivono l'entità rappresentata spazialmente dall'oggetto stesso.

Le informazioni spaziali concernenti un determinato argomento oggetto di analisi vengono raccolte in un tema ("theme"), che rappresenta l'analogo del concetto di relazione presentato nel modello relazionale. La rappresentazione grafica di un tema viene detta mappa tematica.

Sui temi si possono effettuare le operazioni che vengono in generale effettuate sulle relazioni, basate sull'algebra relazionale.

Nel presentare alcuni esempi di tali operazioni si fa riferimento al caso ([103]) dei due seguenti temi:



1. Il tema degli Stati, rappresentante gli stati dell'Europa occidentale, comprendente gli attributi descrittivi Nome, Capitale e Popolazione;
2. Il tema Lingue, rappresentante la distribuzione delle principali famiglie linguistiche, caratterizzato dal solo attributo Lingua.

L'operazione di proiezione, coerentemente con quanto detto nel paragrafo dedicato al modello relazionale, restituisce un tema che contiene un sottoinsieme degli attributi descrittivi del tema di partenza, come si vede nell'esempio in Figura 2-3.

L'operatore di selezione, invece, restituirà il sottoinsieme delle ennuple che soddisfa determinato criterio, fra quelle presenti nel tema originario (Figura 2-4).

La selezione effettuata sulla base del campo geometrico può essere effettuata nelle seguenti differenti modalità:

1. "Windowing": produce un tema che include solo quegli oggetti del tema originario la cui componente spaziale è presente almeno in parte in una finestra di selezione predefinita;
2. "Point query": restituisce invece tutti gli oggetti che contengono un predeterminato punto;
3. "Clipping": è analogo al windowing con la differenza che estrae la porzione della componente spaziale che è contenuta all'interno della finestra di selezione.

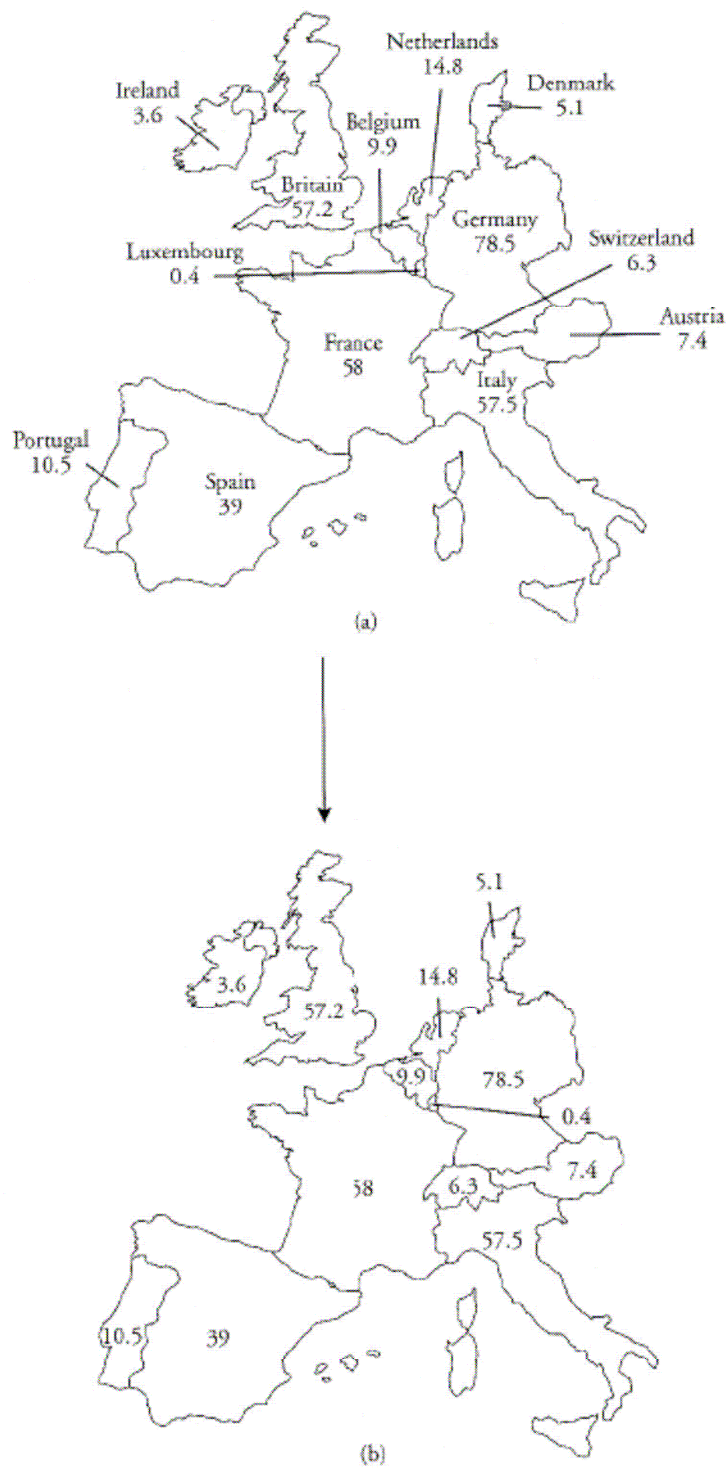
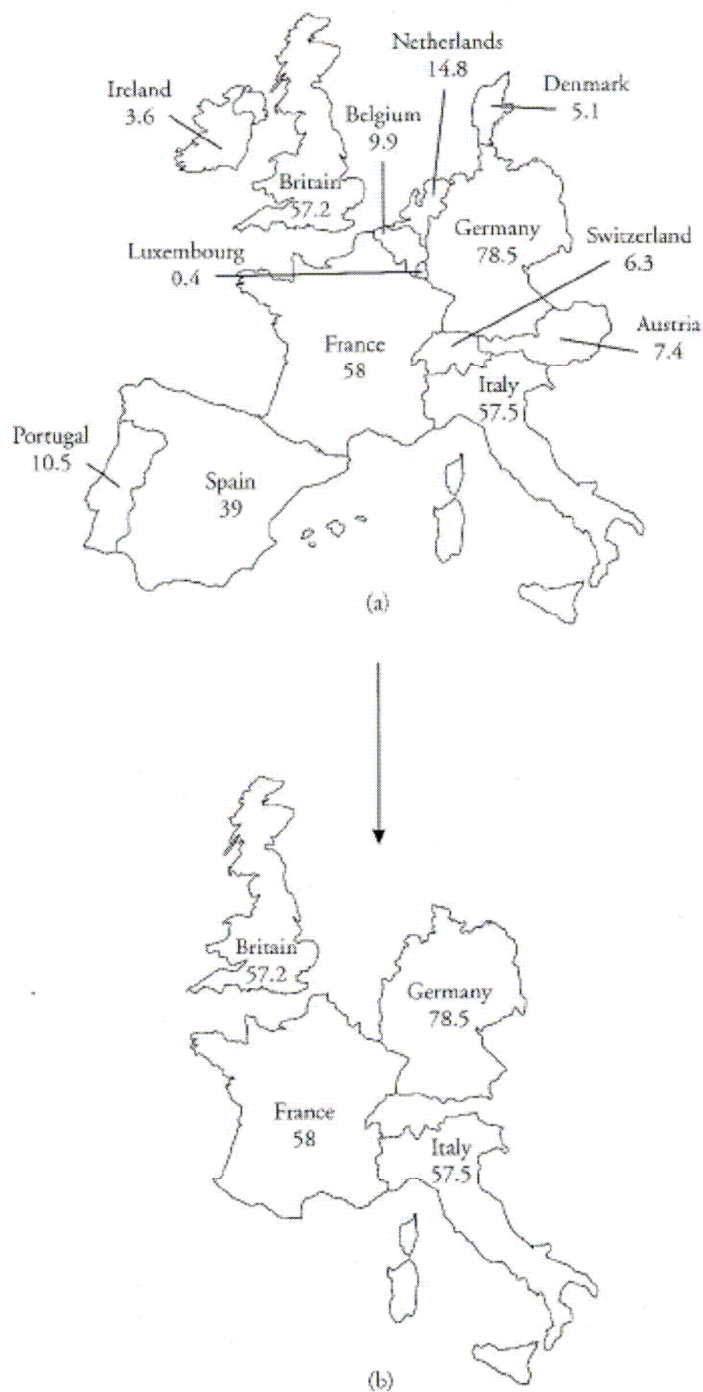


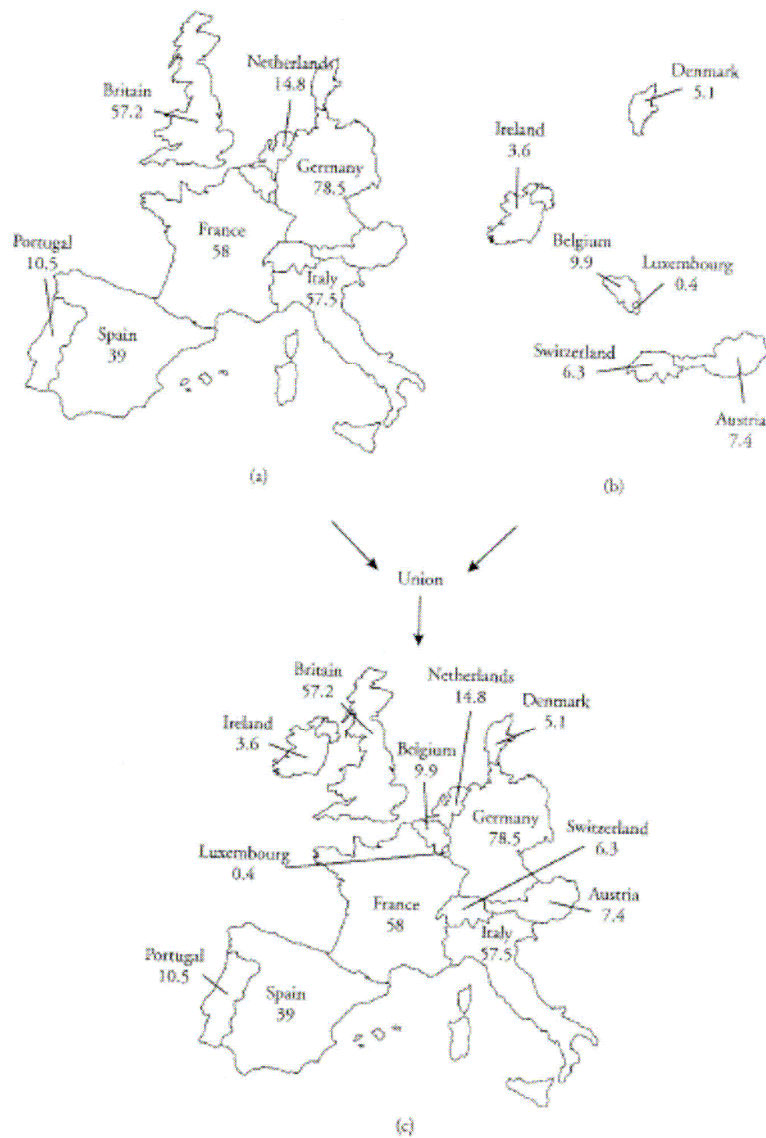
Figura 2-3 – Proiezione di un tema: il tema originario con informazioni relative al nome degli Stati e la popolazione dei paesi dell'Europa occidentale (a) e il tema risultante ddall'operazione di proiezione sull'attributo popolazione (b). Fonte: [103].



**Figura 2-4 – Selezione di un tema: Il tema dei paesi dell’Europa occidentale (a) e la selezione dei paesi con più di 50 milioni di abitanti. (b). Fonte: [103].**

L’operazione di unione, applicata a temi che possiedono lo stesso schema, li unisce in un nuovo tema in cui sono presenti tutte le ennuple degli operandi (Figura 2-5).

Carattere peculiare invece presenta l’operatore di sovrapposizione, detto “Overlay”, tipico dei database spaziali. Tale operatore, applicato a due temi, che possono possedere diverso schema, produce un tema in cui sono presenti le ennuple le cui componenti



**Figura 2-5 –Unione di temi: Il tema dei paesi dell’Europa Occidentale con popolazione maggiore di 10 milioni di abitanti (a), il tema dei paesi dell’Europa occidentale con meno di 10 milioni di abitanti (b) e il tema unione dei due precedenti (c). Fonte: [103].**

spaziali sono comuni ai due temi originari e presenta l’insieme di tutti gli attributi descrittivi presenti nei due operandi (Figura 2-6). Si tratta pertanto di un’operazione di join in cui il campo che funge da collegamento è costituito dalla componente spaziale.

L’operatore “merger” produce un tema formato da ennuple le cui componenti spaziali sono formate dall’unione delle componenti spaziali di ennuple del tema originario individuate sulla base di una condizione specificata (Figura 2-7). Si tratta pertanto di un’operatore unario, a differenza dell’operatore unione che è binario.

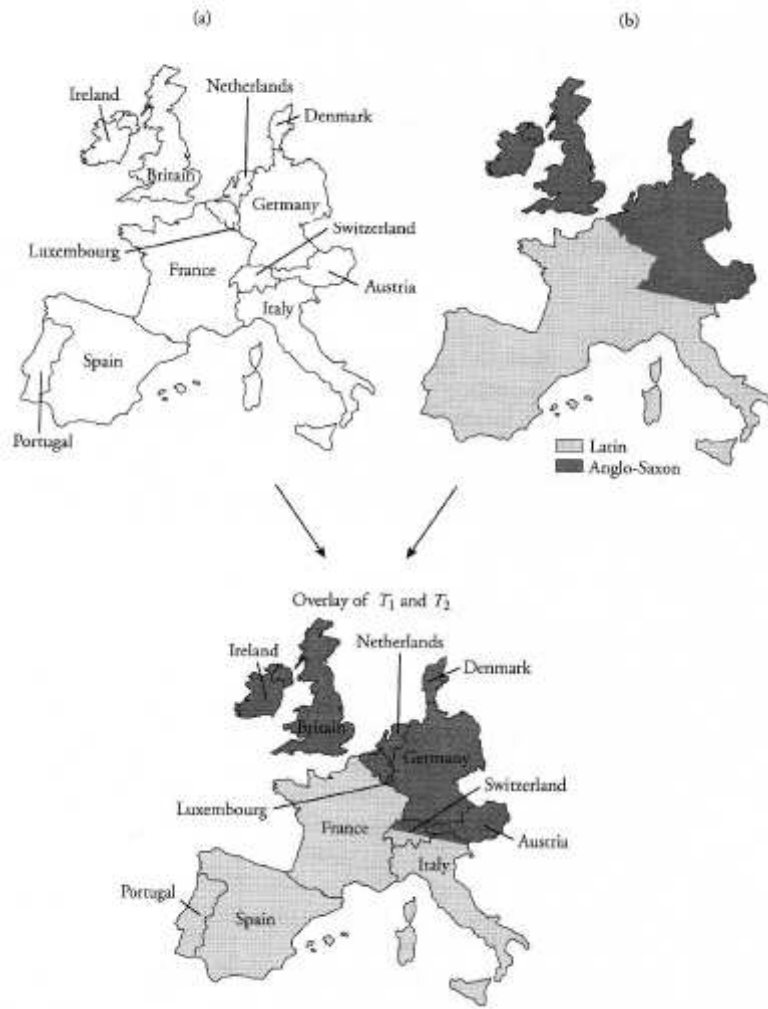


Figura 2-6 – Overlay di temi: Il tema  $T_1$  contenente i paesi dell'Europa occidentale (a) e il tema  $T_2$  relativo alle famiglie linguistiche parlate nell'Europa occidentale (b). Fonte: [103].

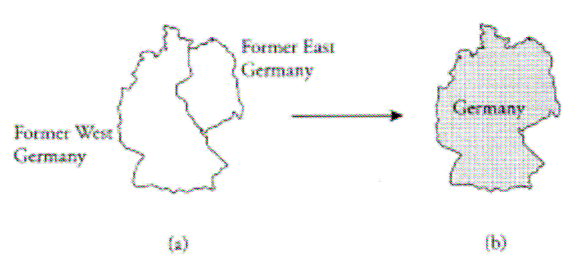


Figura 2-7 – Merging di due oggetti geografici presenti in un tema: tema con i due oggetti distinti (a) e tema col solo oggetto geografico risultante dall'operazione (b). Fonte: [103].

Le operazioni appena descritte appartengono a quella che si potrebbe definire algebra dei temi, in cui gli operatori producono come risultato un tema a partire da uno o più temi.

D'altra parte vi sono anche operazioni che producono risultati numerici (ad esempio il calcolo della distanza fra gli oggetti geometrici) e altre più complesse che sono basate sulle relazioni di tipo topologico fra i dati, di cui si dirà nel seguito.

Il problema principale della gestione dei dati spaziali consiste nell'adozione di strutture dati che permettano di rispondere efficacemente a interrogazioni inerenti alla disposizione nello spazio dei dati (ovviamente garantendo anche la possibilità di effettuare interrogazioni in cui sono presenti aspetti spaziali e non).

Per soddisfare tale esigenza è necessaria l'adozione di strutture dati speciali, in cui la contiguità geografica viene rappresentata nella struttura dati stessa e di una adeguata descrizione dello spazio su cui viene effettuata l'analisi.

Per quanto concerne la schematizzazione dello spazio oggetto di analisi in generale esso viene considerato uno spazio euclideo di dimensione generalmente, ma non necessariamente, pari a due<sup>1</sup>. Pertanto i punti appartenenti a tale spazio saranno descritti per mezzo di una coppia di coordinate.

La modellizzazione dello spazio può seguire due diversi approcci.

Nel primo approccio viene fatto riferimento ad oggetti costituiti da punti dello spazio a cui sono attribuite alcune comuni proprietà distintive, che portano ad assegnarli ad un'identità ben precisa, espressa col termine entità ("entity" o "feature").

Ovviamente l'associazione dei punti dello spazio in tali entità dipende dal contesto di analisi. Ad esempio lo stesso insieme di punti andrà a costituire entità di forma diversa nel caso di un'analisi geologica, rispetto a quanto verrà fatto in sede di analisi del sistema dei trasporti. Anche il livello di dettaglio dell'analisi esercita in tal senso una notevole influenza. Ad esempio uno stesso incrocio potrà essere schematizzato come un punto o come un insieme di linee, a seconda che l'analisi venga effettuata a livello macroscopico o microscopico. Un insieme di tali entità, designate in base ad un determinato scopo, costituiscono un tema.

La definizione degli oggetti spaziali come insiemi di punti si rivela poco efficiente. Si definiscono pertanto i seguenti tipi di oggetto spaziale:

Oggetti zero-dimensionali o punti: utilizzati per rappresentare la localizzazione di entità la cui forma non riveste interesse nell'analisi effettuata;

---

<sup>1</sup> In realtà l'analisi sarà limitata ad una regione dello spazio, contenente le entità di interesse, detta "embedding space" o "search space".

Oggetti lineari o monodimensionali: vengono utilizzati prevalentemente per rappresentare reti (stradali, di telecomunicazioni ecc.). La tipologia di base è costituita dalla polilinea, definita come un insieme finito di segmenti lineari (“edge”) ordinati e consecutivi. Pertanto il nodo (vertice) finale del segmento precedente coincide col nodo iniziale del segmento successivo.

Oggetti bidimensionali o superfici: utilizzati per rappresentare entità in cui l’estensione assume importanza rilevante, come le zone in cui viene suddiviso il territorio nell’ambito nell’analisi della domanda di trasporto oppure le suddivisioni amministrative del territorio stesso. La tipologia fondamentale è costituita dai poligoni, intesi come la porzione di piano racchiusa da una polilinea. Un insieme di poligoni si dice regione.

Un’approccio alternativo nella modellizzazione dello spazio associa gli attributi di interesse (ad esempio temperatura, quota rispetto al livello del mare, entità delle precipitazioni) direttamente ai punti dello spazio, attraverso funzioni continue definite sulle coordinate  $x$  e  $y$  dello spazio. Tale approccio, pertanto, considera lo spazio come il “campo” (“field”) in cui vengono descritti i fenomeni analizzati, senza far riferimento ad altri oggetti, come le entità del caso precedente.

Nell’implementazione dell’informazione spaziale, quale che sia la modalità di modellizzazione attuata, si deve superare la difficoltà costituita dal fatto di dover rappresentare nel calcolatore l’insieme infinito di punti proprio dello spazio euclideo.

Tale problema può essere risolto approssimando lo spazio finito con uno spazio discreto (“tessellation”) oppure attraverso la realizzazione di idonee strutture dati (modo vettoriale e rappresentazione mediante semipiani).

Nel primo caso si attua una suddivisione del piano in celle che possono avere forma fissa, attraverso una griglia regolare detta raster, oppure irregolare<sup>1</sup>.

Nel caso di rappresentazione raster la porzione di spazio bidimensionale analizzata viene suddivisa in un numero finito di celle rettangolari, dette pixel.

La modalità tessellation viene frequentemente utilizzata in applicazioni in cui si utilizzano dati ricavati da immagini fornite da rilevamenti a distanza, perlopiù satellitari, come nel caso di previsioni meteorologiche o dell’inquinamento. In tali situazioni

---

<sup>1</sup> Ad esempio nel caso dei poligoni di Thiessen, costituiti dall’insieme di poligoni  $p$  che, dato insieme di punti  $P$  ognuno dei quali è associato ad uno dei poligoni, realizza la condizione per cui il punto più vicino a  $P$  è  $p$ . La partizione corrispondente del piano viene detta diagramma di Voronoi.

l'approccio basato su campi porta alla definizione di una funzione che però, in seguito alla discretizzazione, è definita su un insieme finito, costituito dall'insieme delle celle.

Tale risultato viene conseguito operativamente tramite una strutturazione dei dati ad albero, corrispondente ad un partizionamento del dominio spaziale a cui appartengono i dati.

Nel caso delle informazioni descritte tramite entità, l'oggetto geometrico viene rappresentato per mezzo dell'insieme dei pixel in cui è presente una porzione dell'oggetto.

In tal caso tuttavia si ha un ricorso più limitato all'approccio tesselation, in quanto tali entità si prestano alla rappresentazione vettoriale di seguito descritta. Infatti la rappresentazione con suddivisione in celle spesso richiede, per conseguire una buona approssimazione della realtà, un numero elevato di celle, con conseguente consumo di risorse.

Nella rappresentazione vettoriale invece gli oggetti vengono definiti in termini di punti e segmenti utilizzati come primitive. Pertanto è evidente il fatto che la rappresentazione vettoriale sia meno onerosa, a parità di risultato finale, rispetto a quella raster, in particolare modo nel caso dei poligoni che vengono rappresentati tramite un insieme finito dei vertici del loro contorno.

Tuttavia la rappresentazione vettoriale è piuttosto indefinita, non prevedendo una descrizione che renda conto esplicitamente delle differenze fra diverse tipologie di oggetti geometrici. Ad esempio non viene previsto in maniera organica una distinzione fra poligoni composti e semplici, oppure convessi e concavi.

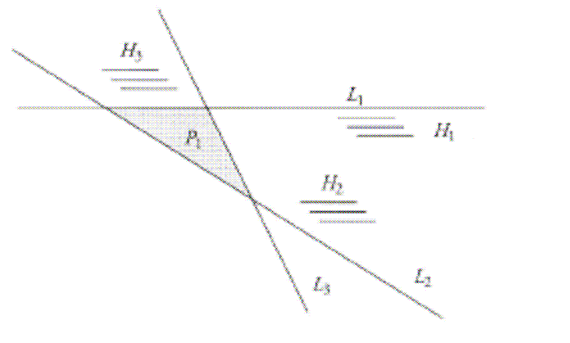
L'approccio vettoriale viene utilizzato anche nel caso di modellizzazione tramite campi di valori.

Un esempio è fornito dalla rappresentazione tridimensionali dei modelli DEM (Digital Elevation Models), adottati, in generale, nella descrizione dell'andamento di una funzione continua rappresentativa di un fenomeno (come ad esempio temperatura o pressione) definito su di uno spazio bidimensionale. In tali modelli la funzione viene definita non più su tutti i valori del dominio ma solo in un campione di punti. I valori corrispondenti agli altri punti vengono ottenuti per mezzo di un procedimento di interpolazione. Fra i diversi procedimenti di interpolazione possibili, largo utilizzo hanno quelli che prevedono una partizione del dominio in triangoli irregolari (da cui il nome TIN: Triangulated Irregular Networks). Pertanto vengono registrati i valori di



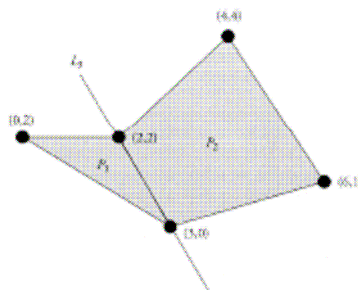
quota di ogni vertice dei triangoli, mentre quelli degli altri punti vengono ricavati per interpolazione lineare da quelli dei vertici del triangolo di appartenenza.

Una alternativa, sviluppata di recente, che offre possibilità di strutturazione più rigorosa rispetto al modello vettoriale, è costituita dalla rappresentazione mediante semipiani. I semipiani corrispondono a insiemi di punti del dominio che soddisfano determinate disequazioni. Pertanto un poligono convesso può essere considerato come l'insieme di punti che soddisfano l'insieme di condizioni che corrispondono ai semipiani delimitati dalle rette di appartenenza dei lati del poligono (Figura 2-8).



**Figura 2-8 – Esempio di definizione di un poligono convesso per mezzo di semipiani. Fonte: [103].**

La sovrapposizione di diversi insiemi di vincoli, che definiscono un singolo poligono convesso, permette poi di realizzare gli altri tipi oggetto geometrico (Figura 2-9).



**Figura 2-9 – Esempio di realizzazione di un poligono complesso a partire da poligoni convessi. Fonte: [103].**

Particolare attenzione richiede poi la rappresentazione degli insiemi di oggetti geometrici e delle loro mutue relazioni.

Vi sono differenti approcci in tal senso, che si distinguono principalmente nell'espressione delle relazioni topologiche fra gli oggetti geometrici.

Le relazioni topologiche descrivono le relazioni spaziali fra diversi oggetti geometrici e comprendono l'adiacenza, la sovrapposizione, la disgiunzione e l'inclusione.

La loro esplicitazione arricchisce la rappresentazione del modello spaziale, ma d'altra parte la rende più complicata. In tal senso la rappresentazione più semplice è costituita dal modello "spaghetti" in cui ogni oggetto viene descritto separatamente dagli altri. L'assenza della componente topologica semplifica la descrizione, ma comporta la presenza di ridondanze. Ad esempio un elemento spaziale condiviso da due oggetti, come un confine in comune fra due zone, viene infatti archiviato due volte separatamente.

Una maggiore strutturazione è offerta dal modello di rete. In tal caso viene archiviata l'informazione relativa alla connessione fra punti e polilinee.

Viene a tale scopo introdotto il concetto di nodo, ossia di punti che connettono insieme di archi, che costituiscono gli elementi lineari della rete. In tal modo è possibile descrivere percorsi lungo rete ed eseguire gli algoritmi che li analizzano (come ad esempio quelli di costo minimo).

A seconda delle diverse esigenze la rete può essere o meno planare. Pertanto all'occorrenza è possibile fare in modo che due archi si incrocino senza creare un'intersezione fra di loro (fornendo una rappresentazione idonea ad esempio a condizioni di sovrappasso o sottopasso). Tuttavia va osservato come anche col modello di rete non venga registrata alcuna informazione sulle relazioni topologiche inerenti oggetti bidimensionali. Per la rilevanza delle sue applicazioni il modello di rete sarà oggetto di approfondimento nel seguito della trattazione.

Il modello detto topologico, invece, permette una completa descrizione delle relazioni topologiche, eliminando così le ridondanze. Tale descrizione è simile al modello di rete con la differenza che la rete è sempre planare e produce una suddivisione dello spazio in poligoni adiacenti agli archi della rete.

La definizione di una struttura topologica permette di implementare il modello relazionale, con i conseguenti vantaggi in termini di facilità di interrogazione e di interazione coi dati, anche nella definizione delle caratteristiche spaziali.

Tuttavia va considerato il fatto che alcuni dei poligoni creati possono non avere alcun significato nel mondo reale e comunque la complessità insita in tale modello può rallentare alcune operazioni, tra cui l'inserimento di nuovi oggetti.

Le particolari problematiche poste implicano la necessità di estendere il modello relazionale per gestire efficacemente il dato spaziale<sup>1</sup> introducendo nuovi tipi di dato, in cui la contiguità geografica viene rappresentata nella struttura dati stessa, e funzioni operanti sugli stessi. Pertanto è necessario introdurre nuovi tipi di dato astratto (ADT: Abstract Data Types), per i quali vanno previste specifiche operazioni. Tali tipi di dato presentano la caratteristica dell'incapsulamento, nel senso che non deve essere nota all'utilizzatore l'implementazione interna di tali operazioni. Tale caratteristica è propria del paradigma ad oggetti, che è stato, come si è visto, esteso al campo delle basi dati proprio per soddisfare situazioni in cui si hanno dati di tipo complesso come quelli spaziali.

Si sottolinea infine come l'implementazione e l'utilizzo efficiente (per interrogazioni, indicizzazioni ecc.) delle strutture dati spaziali comporti in fase implementativa particolari soluzioni, che prevedono una strutturazione dei dati ad albero, corrispondente ad un partizionamento del dominio spaziale a cui appartengono i dati.

### **2.2.2 Oracle Spatial**

Il DBMS presenta un modulo che fornisce funzionalità avanzate di analisi spaziale denominato Oracle Spatial.

Oracle Spatial è composto da:

- Uno schema, denominato MDSYS, preposto all'archiviazione e definizione dei tipi geometrici predefiniti o creati dall'utente;
- Un meccanismo di indicizzazione spaziale;
- Operatori, funzioni e procedure per interrogazioni e analisi di tipo spaziale;
- Un modello dati che permette una descrizione di elementi spaziali definiti per mezzo di relazioni topologiche;

---

<sup>1</sup> Per un'esemplificazione dell'insufficienza del modello relazionale con i normali tipi di dato nella descrizione degli elementi spaziali si veda [103] a pg.22-25.

- Un modello dati che permette una descrizione di elementi spaziali definiti come nodi e archi di una rete (descritto nel seguito);
- GeoRaster, una funzionalità che consente di archiviare e analizzare dati raster come le immagini, memorizzati tramite un grigliato regolare in cui ad ogni cella viene associato un valore alfanumerico.

Oracle Spatial è basato sul modello relazionale a oggetti<sup>1</sup> e permette l'archiviazione di un'intera geometria attraverso un tipo di dato spaziale nativo, definito per dati vettoriali detto SDO\_GEOMETRY. In una tabella possono essere presenti una o più colonne con tale tipo di dato.

Per operare su tale tipo di dato è presente un'estensione del linguaggio SQL conforme alle specifiche riguardanti ODBC e SQL promulgate dal consorzio Open GIS.

L'implementazione del modello relazionale a oggetti realizzata include:

- Supporto a molteplici tipi di geometrie, compresi archi, cerchi, poligoni composti, polilinee, rettangoli;
- Facilità nella creazione di indici spaziali e nell'effettuazione di query spaziali.

La descrizione dell'informazione spaziale può essere effettuata secondo diverse modalità. Infatti, accanto ad una funzionalità dedicata alla rappresentazione in formato raster (GeoRaster), ve ne sono altre che si basano su modalità di rappresentazione vettoriale. Inoltre, in quest'ultimo caso, la descrizione può essere effettuata attraverso una rappresentazione che consideri l'oggetto geometrico con riferimento semplicemente ad un sistema di riferimento esterno, oppure con riferimento ad un sistema di riferimento lineare impostato lungo gli elementi lineari dell'oggetto stesso (LRS: Linear Reference System). Quest'ultima soluzione risulta particolarmente idonea a semplificare operazioni di segmentazione dinamica, descritte nei successivi paragrafi (nell'ambito del modello di rete). Un'ulteriore schematizzazione possibile, come sopra riportato, prevede un'implementazione di un modello di tipo topologico.

### **2.2.3 Sistemi Informativi Geografici**

I dati relativi a fenomeni e attività localizzate territorialmente, come nel caso del sistema di trasporto, possono essere trattati in maniera efficiente mediante un sistema

informativo geografico (GIS), ossia attraverso un particolare tipo di sistema informativo spaziale che fa riferimento ad una rappresentazione della superficie terrestre, permettendo l'elaborazione di dati geografici e la loro rappresentazione grafica su mappa.

Pertanto gli elementi caratterizzanti un GIS sono:

- La capacità di attribuire ad ogni oggetto le sue coordinate geografiche spaziali, ossia di georeferenziare i dati;
- La possibilità di associare informazioni alfanumeriche di vario tipo, indicate come “attributi”, ad elementi geometrici rappresentativi di oggetti sul territorio (nodi o punti, segmenti o linee, aree o poligoni);
- La possibilità di ottenere nuove informazioni a partire dai dati degli archivi di base: aggregandoli oppure elaborandoli.

Gli oggetti appartenenti al mondo reale vengono quindi memorizzati come oggetti geometrici che mantengono tutte le informazioni riguardanti le mutue relazioni spaziali, quali la connessione, l'inclusione, l'adiacenza; in altre parole i dati sono strutturati definendone la topologia (in maniera più o meno esplicita a seconda del tipo di modellizzazione scelta).

Si osservi come anche database di tipo generale possano contenere informazioni sulla localizzazione (ad esempio indirizzi e codici postali), tuttavia nel caso di un GIS la georeferenziazione viene utilizzata come mezzo primario di memorizzazione ed accesso ai dati, utilizzando le caratteristiche dei database spaziali descritte nel precedente paragrafo.

Le aree di utilizzo dei GIS sono numerose, essendole potenzialmente tutte quelle i cui dati sono caratterizzate dal riferimento territoriale. Limitandosi al campo dei Trasporti sono state sviluppate una molteplicità di differenti applicazioni in crescente aumento negli ultimi anni [79].

### ***2.2.3.1 Funzionalità tipiche dei GIS***

I GIS presentano funzionalità specifiche di vario tipo, basate sulle potenzialità dei sistemi informativi spaziali descritte in precedenza.

---

<sup>1</sup> Il modello relazionale, implementato nelle precedenti versioni, non è più presente nell'attuale versione.

Alcune, più semplici, permettono operazioni come l'analisi di prossimità, che consente di determinare gli elementi ad una prefissata distanza da un certo punto, il calcolo delle distanze e di aree.

Altre funzionalità più complesse e caratterizzanti i GIS rispetto ad altri strumenti informatici sono il "geocoding", il "buffering", le interrogazioni ("query") spaziali e gli operatori tridimensionali.

Il geocoding è il processo che permette di ottenere un'informazione geografica esplicita da riferimenti impliciti, ad esempio visualizzando un punto su di una mappa (e quindi le coordinate relative) a partire dalla conoscenza di un indirizzo.

Tra le operazioni sui temi viste in precedenza, particolarmente utilizzata è la funzione di overlay, che consente di sovrapporre mappe tematiche, chiamate "layer" (piani), integrando diversi livelli informativi.

Le funzioni di buffering, costituiscono particolari operazioni di selezione su finestra che permettono di creare un'area di analisi intorno agli oggetti geografici. Pertanto si prestano ad un'immediata applicazione nell'identificare di fasce di rispetto di intorno a strade, ferrovie, elettrodotti ecc.

Notevole utilizzo hanno anche gli operatori tridimensionali, che consentono di gestire oggetti tridimensionali (sulla base di tre coordinate reali). Un caso particolarmente rilevante è quello delle reti TIN nella realizzazione di un Digital Terrain Model (DTM) o un Digital Elevation Model (DEM). Infatti a partire da un modello tridimensionale è possibile effettuare un vasto numero di analisi che richiedono o vengono facilitate da un approccio tridimensionale ad esempio, calcolare lunghezze reali e non approssimate dalla rappresentazione bidimensionale, effettuare analisi di visibilità, creare profili longitudinali, analisi di pendenza, di esposizione.

L'effettuazione dell'analisi di reti (ad esempio reti di trasporto, reti di distribuzione di acqua, gas, elettriche, telefoniche, ecc.) sono basate su una strutturazione dei dati attraverso il modello di rete. Vista la rilevanza dell'argomento in funzione delle tematiche affrontate nella presente tesi, tale schematizzazione verrà affrontata in un apposito paragrafo nel seguito della trattazione.

Va ricordato e sottolineato che, per quanto visto in precedenza, le potenzialità dell'utilizzo dei DBMS per i presenti fini non si esauriscono nella capacità di archiviazione, gestione e rappresentazione dei dati, ma anche nel processo attivo di estrazione delle informazioni dagli stessi.

### **2.2.3.2 L'architettura dei GIS**

Un Sistema Informativo Geografico può essere installato su un'ampia gamma di piattaforme hardware (dalla rete di PC gestita da un server fino al PC usato singolarmente) in funzione del grado di complessità dell'applicazione specifica, della dimensione dei dati da trattare e del contesto operativo.

Le caratteristiche tipiche di un sistema GIS complesso, in uso ad esempio presso un ufficio della Pubblica Amministrazione, possono prevedere (cfr. [79]):

- Un'architettura client/server;
- Un'architettura modulare e integrata di tipo ERP (Enterprise Resource Planning) nella gestione del complesso di elementi che concorrono al funzionamento di un sistema GIS;
- Utilizzo dei software GIS commerciali e di loro estensioni esistenti o appositamente realizzate, per integrarne le funzioni;

L'architettura client/server consente, come già visto, di rendere disponibili i dati a tutti i soggetti che interagiscono su più livelli. Si compone generalmente di un database relazionale su server, interrogabile direttamente tramite linguaggio SQL ed accessibile dai vari client, in rete.

All'interno del sistema i dati distribuiti sulla rete vengono gestiti in maniera totalmente indipendente in fase di accesso ed analisi.

La struttura gerarchica con cui sono organizzate le informazioni permettono una lettura immediata dei dati di tipo sintetico; alle informazioni disaggregate e di maggior dettaglio si perviene poi direttamente, approfondendo la richiesta sulle voci di interesse.

L'interfaccia GIS permette di accedere alle informazioni grafiche e testuali, relative alla struttura e alle caratteristiche del sistema, sia selezionando graficamente oggetti, sia interrogando direttamente i database, anche tramite interfacce grafiche semplificate, che non richiedono la conoscenza del linguaggio SQL.

A causa della quantità di livelli di utenza e di sottosistemi che interagiscono con base di dati, è opportuno sviluppare delle regole di consultazione e di protezione dei dati. Il mantenimento dell'integrità e validità dei dati richiedono, infatti, la predisposizione di

opportuni meccanismi di convalida prima del salvataggio delle modifiche nella base di dati.

### **2.2.3.3 I GIS su Internet**

Lo sviluppo di Internet ha coinvolto anche il settore dei GIS. Spesso, infatti, le Amministrazioni Pubbliche hanno l'esigenza di divulgare rappresentazioni dei risultati delle elaborazioni, ad esempio mappe digitali per informare il cittadino su servizi di pubblica utilità (come il servizio di trasporto pubblico), mentre nel caso di società private è presente l'esigenza di diffondere informazioni alla clientela.

L'esigenza di tali operatori non si limita a consentire la semplice visualizzazione di mappe, ma anche fornire ai clienti la possibilità di consultare dati ad esse connessi e di effettuare ricerche di informazioni.

Nel caso dell'estensione delle tecnologie Internet ad applicazioni di reti Intranet aziendali la necessità di poter eventualmente modificare i dati sarà maggiormente presente.

In vista di tali obiettivi le case produttrici di software GIS (descritti nel paragrafo successivo) hanno realizzato moduli per la pubblicazione dei dati GIS su Internet, mediante l'uso dei protocolli di comunicazione standard.

L'architettura del sistema dovrà quindi prevedere delle componenti per gestire l'accesso via Web al sistema informativo attraverso diverse modalità, mediante le soluzioni architetturali e tecnologiche descritte in precedenza

I software client potranno appartenere a tre principali tipologie, a seconda delle esigenze dell'utente finale:

- Client leggeri HTML (i comuni browser), molto semplici, che permettono solo la visualizzazione, consultazione, ricerca e l'interrogazione dei dati;
- Client java, maggiormente diffusi nelle applicazioni Intranet aziendali, i quali consentono, oltre alle operazioni di ricerca, interrogazione e visualizzazione, di effettuare alcune modifiche su dati, perlopiù semplici e non strutturali;



- Client desktop GIS, in grado di effettuare operazioni di consultazione e modifica sfruttando le funzionalità dei software GIS.

#### **2.2.3.4 Principali software per le applicazioni GIS**

In questo paragrafo viene fatta una breve rassegna dei principali software GIS commerciali e formati dei file raggruppati per casa produttrice, si rimanda per eventuali approfondimenti ai relativi siti Web.

I diversi sistemi prevedono l'utilizzo di file di tipo proprietario, fra i quali tuttavia è emerso come standard di fatto (grazie alla diffusione del software che lo implementa e al fatto che è stato reso pubblico, avendo la casa produttrice divulgato le informazioni sulla sua strutturazione) il formato .shp ESRI di seguito descritto.

#### **Il formato Shapefile**

Lo shapefile ESRI è un formato di files per l'archiviazione di informazioni di tipo vettoriale riguardanti entità geografiche e relativi attributi, ad esclusione delle informazioni di tipo topologico.

Il formato consente la rappresentazione di geografiche in termini di primitive geometriche (dette "features") quali: punti, polilinee ed aree.

I dati geografici vengono archiviati mediante l'utilizzo di un insieme di file, allocati nella stessa directory, che hanno in comune il prefisso dei nomi, ma presentano differenti estensioni.

Questi file comprendono sempre tre file obbligatori:

- File principale (\*.shp). Si tratta di un file binario ad accesso diretto con una struttura di records a lunghezza variabile. Ciascun record descrive una forma (shape) mediante la lista dei suoi vertici.
- File indice (\*.shx). Si tratta di un file binario ad accesso diretto con una struttura di records a lunghezza fissa. Ciascun record contiene le indicazioni della posizione del relativo record nel file principale, consentendone così l'accesso diretto.
- File degli attributi (\*.dbf) di tratta di un file nel formato dBASE. Ciascun record è in relazione 1-1 con i records del file principale. L'ordine dei

records deve essere lo stesso dei relativi records nel file principale. La tabella può contenere tutti gli attributi che si desidera associare a ciascuna entità geografica

Opzionalmente possono anche essere presenti i seguenti file, che conservano indici e dati accessori:

- File degli indici spaziali (\*.sbn e \*.sbx )
- File degli indici spaziali delle features in sola lettura (\*.fbn e \*.fbx)
- File degli indici degli attributi dei campi della tabella del .dbf (\*.ain e \*.aih)
- File con informazioni sul sistema di coordinate (\*.prj)
- File contenente il metadato (\*.shp.xml)
- File degli indici degli attributi dei campi della tabella del .dbf in un nuovo formato (\*.atx)

Il formato è documentato ufficialmente ([92]) ed è diventato di fatto uno standard per l'interscambio di informazioni geografiche, supportato in input/output da parte dei principali applicativi software presenti sul mercato.

## GML e KML

Uno standard di riferimento nella rappresentazione dei dati geografici è inoltre rappresentato da GML (Geography Markup Language), realizzato dall'Open Geospatial Consortium (OGC). L'OGC è un'organizzazione internazionale che si pone l'obiettivo di sviluppare ed implementare standard inerenti il contenuto, i servizi e l'interscambio di dati geografici che siano "aperti ed estensibili".

GML consiste in una la grammatica XML che serve come linguaggio di modellazione di informazioni geografiche ma anche come un formato aperto di interscambio per transazioni via Internet.

Il formato KML, anch'esso basato su XML, si è recentemente imposto come veicolo universale per la diffusione via Web di dati geografici presso grande pubblico. La sua diffusione, testimoniata dalla sua implementazione presso i maggiori software GIS, è fondamentalmente legata alla enorme diffusione del software Google Earth tra gli utenti della Rete.

## ESRI

La ditta ESRI ha prodotto, oltre al formato shapefile di cui s'è detto, un'ampia gamma di prodotti GIS, che formano il sistema ArcGIS, progettata per soddisfare le diverse tipologie di esigenze.

In ArcGIS vi sono inanzitutto client, utilizzabili su piattaforme desktop come Arcview, ArcEditor e ArcInfo (in ordine crescente di complessità e potenzialità), o differenti come ArcPAD (per applicazioni su palmari) ed i client JAVA/HTML per applicazioni in ambito Internet e/o Intranet (HTML Viewer, JAVA Viewer).

Come soluzioni su piattaforma server vi sono ArcSDE per l'accesso ai database relazionali DBMS e ArcIMS per la diffusione dei dati in architettura Internet/Intranet.

Sono inoltre presenti moduli aggiuntivi per l'utilizzo di funzionalità specifiche, come ad esempio ArcGIS Spatial Analyst per la gestione e l'analisi dei dati raster, ArcGIS Network Analyst per la ricerca ed analisi dei percorsi di rete.

## MAPINFO

Il programma Mapinfo utilizza i dati in formato “.tab” per l'archiviazione dei dati<sup>1</sup>.

Anch'esso presenta una strutturazione in diversi moduli e pacchetti aggiuntivi in vista di diverse esigenze.

Mapinfo Professional costituisce il client GIS ed è possibile estenderne ed automatizzarne specifiche funzionalità attraverso l'ambiente di sviluppo Mapbasic.

MapXtreme invece fornisce le funzioni di server per la distribuzione delle applicazioni cartografiche, mentre Spatialware consente di memorizzare e manipolare i dati nell'ambito di DBMS relazionale. MapX permette infine di incorporare le funzionalità di mapping proprie di Mapinfo in qualsiasi altro software.

---

<sup>1</sup> Esistono comunque delle funzionalità di conversione fra i diversi formati offerte dalle case produttrici o da terze parti.

## AUTODESK

Autodesk, casa produttrice del diffuso software CAD Autocad, presenta prodotti GIS orientati tuttavia principalmente alla produzione ed elaborazione cartografica, quindi legati all'aspetto grafica piuttosto che alla elaborazione dei dati.

Il prodotto Autodesk Map, basato su Autocad, costituisce una soluzione client, mentre Autodesk GIS Design Server presenta la componente server.

## INTERGRAPH

Discreta diffusione presenta anche il software GeoMedia di Intergraph. Geomedia offre tutte le più tipiche funzionalità di analisi dei GIS, integrando in ambiente unico, grazie ad un'architettura informatica di tipo aperto, i dati di diversi formati sia propri di ambienti CAD che GIS.

### ***2.3 Il modello di rete nella rappresentazione delle relazioni spaziali***

In molti casi la distanza da considerare fra due oggetti collocati spazialmente non è semplicemente la distanza nello spazio cartesiano (perlopiù euclideo), determinata solamente dal reciproco posizionamento dei due oggetti nello spazio. Nella pratica infatti accade spesso che la distanza da considerare sia quella relativa a percorsi che possono venire effettuati in un predefinito insieme di traiettorie, che vengono rappresentate tramite una rete (stradale, ferroviaria, fluviale, ecc.). In tali casi quindi la distanza va misurata lungo gli archi del percorso più corto che nella rete collega i due elementi.

Il modello di rete, di cui s'è accennato in precedenza, diviene allora il paradigma di riferimento per la rappresentazione di tali oggetti.

Inoltre l'adozione di tale modello permette di usufruire degli algoritmi sviluppati nell'ambito della teoria dei grafi. Del resto la diffusione di tale schematizzazione in molti campi applicativi, preesistente alla sua formalizzazione nel campo delle basi di

dati, implica il fatto che anche la realizzazione dei relativi sistemi informativi dovrà quantomeno interagire con tale modalità di schematizzazione, se non adottarla.

È importante notare come, nel caso del modello dati nell'analisi spaziale sia dato maggior risalto agli archi, rispetto a quanto avviene nella teoria dei grafi. In tal caso infatti gli elementi lineari, non sono intesi semplicemente come elementi di collegamento, ma vengono descritti nelle loro caratteristiche morfologiche, tra cui l'oggetto geografico. Inoltre possono costituire il riferimento per entità di interesse nell'analisi, generalmente rappresentate tramite punti (POI: Point Of Interest). Ad esempio ad un arco che schematizza una tratta del trasporto pubblico può, ad una certa distanza dall'origine, appartenere una fermata (rappresentata tramite un punto in un altro tema). La possibilità di associare diversi insiemi di attributi a qualsiasi segmento di un elemento geografico lineare senza dover cambiare la struttura fisica di quest'ultimo viene detta "segmentazione dinamica".

In tal modo è possibile associare informazioni diverse a porzioni differenti di un arco (senza dover effettivamente spezzare l'arco).

Ciò semplifica enormemente l'acquisizione dei dati, in quanto consente di memorizzare e gestire solamente una coordinata di posizione anziché due.

Si può constatare come tale sistema di riferimento risulta più vicino alla logica dell'utilizzatore finale: differenti tipologie di dato, come ad esempio, stato della pavimentazione, contesto urbanistico, Comune di appartenenza, limiti di velocità nel caso di una rete stradale, possono essere associati agevolmente al medesimo grafo.

La segmentazione dinamica è basata sulla definizione della "route", un elemento lineare a cui possono essere associati degli attributi; la route può essere costituita da un insieme di archi, ma senza il vincolo che i suoi estremi debbano coincidere con il nodo iniziale o finale di un arco. Pertanto essa può comprendere anche parti di un arco.

Tuttavia, nonostante tali possibilità di rappresentazione e in generale i notevoli progressi verificatisi nel campo dei database spaziali, è stato rilevato come manchi ancora una soddisfacente modellizzazione del modello di rete.

Infatti la gran parte degli algoritmi utilizzati anche nell'analisi spaziale di rete si fondano sulla nozione di prossimità spaziale anziché su quella di connessione.

Una strada promettente, per superare tali limitazioni, sembra essere costituita dalla modellizzazione dello spazio detta "constraint data model", sviluppato di recente.

Tale modellizzazione cerca di superare il limite maggiore del modello relazionale nei confronti dei dati spaziali, costituito dalla sua difficoltà nel gestire un insieme infinito di relazioni. La soluzione proposta prevede, anziché aggiungere nuovi tipi di dato, di offrire una rappresentazione delle infinite relazioni per mezzo di un insieme finito di vincoli, come visto nel caso della rappresentazione degli oggetti spaziali mediante sempiani.

In tal modo diventa possibile utilizzare direttamente le funzionalità del modello relazionale, senza bisogno di realizzarne estensioni, che nel caso del paradigma su rete potrebbero divenire particolarmente onerose.

### **2.3.1 Il modello di rete di Oracle**

Un'implementazione delle caratteristiche e funzionalità del modello di rete è fornita dal pacchetto Oracle Spatial Network Model. Si tratta di un modello dati che è costituito da due componenti: uno schema di rete realizzato all'interno della base dati (detto SDO\_NET) e un insieme di funzioni<sup>1</sup> che permettono la rappresentazione e l'analisi della rete. Lo schema prevede tabelle per gli archi, nodi, percorsi e relativi metadati.

Il modello di rete Oracle fornisce un modello dati aperto e generale per la rappresentazione delle reti, che può essere integrato ed utilizzato in specifiche applicazioni, nell'ambito di un'architettura a più livelli (cfr. Figura 2-10).

Esso è integrato nel pacchetto Oracle Spatial, e pertanto usufruisce delle relative strutture dati e funzionalità per la gestione delle informazioni spaziali.

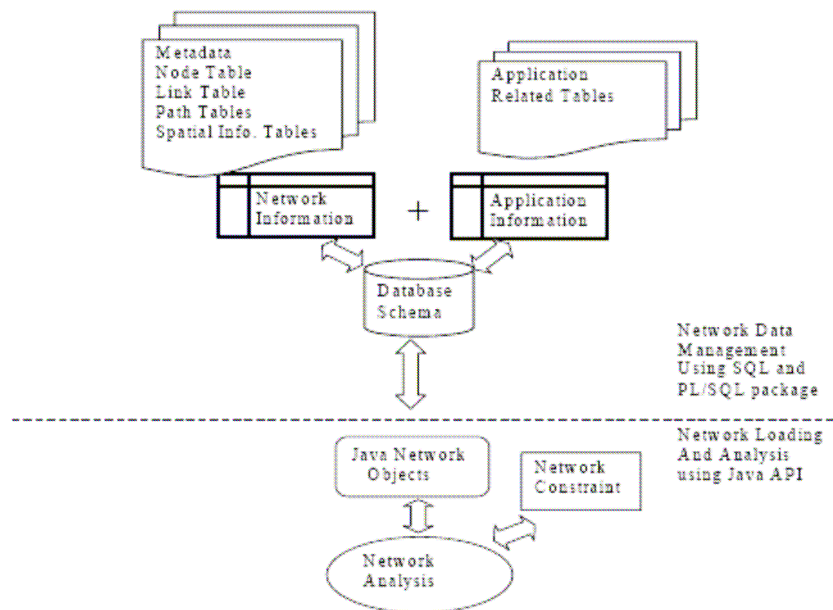
L'adozione di tale schematizzazione permette inoltre di accedere ad una nutrita libreria di algoritmi per l'analisi di rete e a funzionalità che permettono una gestione ottimale delle prestazioni di tale analisi. In particolare è possibile impostarne l'effettuazione nella memoria centrale, evitando così i rallentamenti connessi al ricorso alla memoria di massa (mediante il pacchetto SDO\_NET\_MEM). Simili caratteristiche sono particolarmente rilevanti nel caso di applicazioni in tempo reale, quali ad esempio quelle relative a sistemi ITS.

---

<sup>1</sup> Realizzate mediante API in JAVA e disponibili anche in forma di un pacchetto PL/SQL, ossia come istruzioni in un linguaggio che integra SQL dandogli le funzionalità di controllo tipiche dei linguaggi di programmazione.

Più in generale l'utilizzo di tale modello di rete permette di poter interagire agevolmente con altre funzionalità del database Oracle, come ad esempio Oracle Application Server MapViewer, per la visualizzazione dinamica dei risultati su client Web.

Fra gli esempi di applicazione del modello rete integrato con le altre tecnologie Oracle, vi sono l'implementazione di un algoritmo di scelta del percorso dinamico in un sistema informativo su Web ([110]) e l'utilizzo per la scelta di percorso multimodale, anch'essa su Web ([80]).

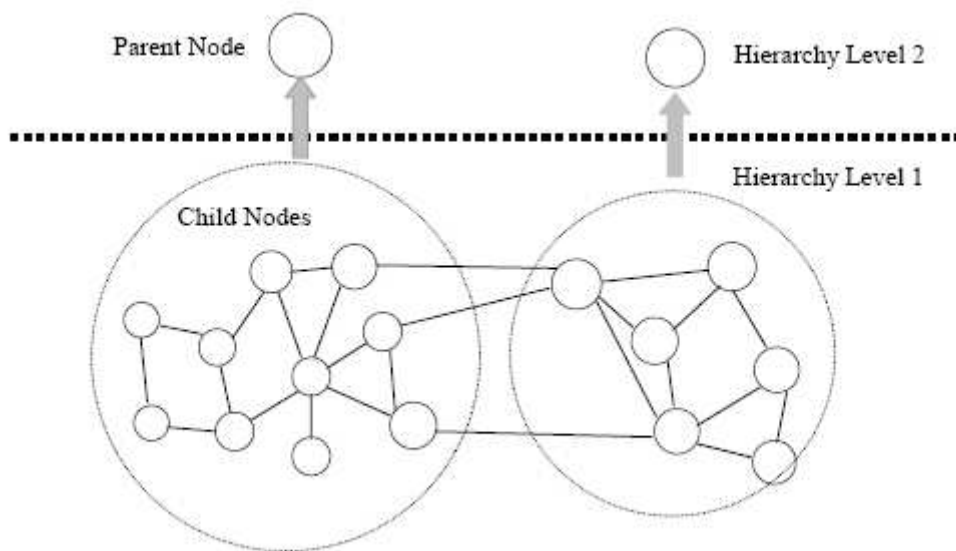


**Figura 2-10 – Architettura del modello di rete di Oracle. Fonte: Oracle,2006.**

La modellizzazione delle reti può essere effettuata scegliendo fra diverse opzioni ed, in particolare, è possibile modellizzare una rete con o senza informazioni di tipo spaziale. Nel primo caso si avrà una rete di tipo logico. Il caso di rete con contenuto spaziale prevede, a sua volta, diverse modalità, corrispondenti alle diverse tipologie di geometria realizzabili con Oracle Spatial:

- Oggetti geometrici di tipo SDO\_GEOMETRY senza sistema di riferimento lineare LRS associato;
- Oggetti geometrici di tipo SDO\_GEOMETRY con sistema di riferimento lineare LRS associato;
- Oggetti geometrici di tipo SDO\_TOPO\_GEOMETRY, con presenza di descrizione topologica.

Per quanto riguarda l'utilizzo di una geometria di tipo LRS nell'analisi di rete, occorre evidenziare come, oltre all'effettuazione della segmentazione dinamica, essa consenta di ottenere ulteriori vantaggi, in particolar modo nel caso di applicazioni (soprattutto in tempo reale) in cui si voglia monitorare l'effettuazione del percorso lungo gli archi della rete (ad esempio evidenziando distanze percorse, tempi e velocità in diversi tratti). Un aspetto importante inoltre, specialmente in vista di applicazioni quali quelle descritte nel seguito del presente lavoro, è costituito dalla possibilità di organizzare i nodi della rete in diversi livelli gerarchici fra loro collegati (cfr. Figura 2-11).



**Figura 2-11 – Rappresentazione delle relazioni gerarchiche fra nodi nel modello di rete di Oracle.**  
**Fonte: Oracle,2006.**

Si noti infine, con riferimento a quanto riportato nel precedente paragrafo, che le funzionalità descritte costituiscono una strutturazione in tabelle dedicate all'analisi di rete di oggetti spaziali che in realtà sono basati sulla sola nozione di contiguità. Pertanto la descrizione delle caratteristiche di connessione viene ricavata in maniera non immediata.



## **2.4 Instaurazione di corrispondenze mediante algoritmi spaziali e di rete: network matching e map matching**

L'utilizzo sempre crescente di applicazioni GIS e GPS pongono la necessità di mettere in relazione i relativi dati allorché essi provengano da fonti eterogenee e la corrispondenza, come spesso accade, non sia esplicitata tramite una relazione fra campi delle rispettive tabelle. Tuttavia il crescente sviluppo delle possibilità di analisi spaziale, di cui s'è detto nei precedenti paragrafi, consente di soddisfare in maniera sempre più agevole tali esigenze. Oltre alle funzionalità immediatamente disponibili attraverso gli operatori spaziali, sono stati sviluppati una serie di algoritmi che permettono di instaurare la corrispondenza con o fra dati spaziali archiviati in mappe digitali. Nel presente lavoro si designerà come network matching il confronto fra due diverse reti, e map matching quando invece il riferimento ad una rete una serie di punti di cui si conoscono le coordinate geografiche e temporali, ottenuti perlopiù attraverso un ricevitore GPS.

### **2.4.1 Algoritmi di network matching**

L'esigenza di confrontare due reti e di verificarne la corrispondenza per integrarne i dati si presenta di frequente in differenti contesti. I metodi tradizionali per trovare la corrispondenza fra reti risultano piuttosto dispendiosi, dal momento che richiedono una notevole mole di operazioni manuali.

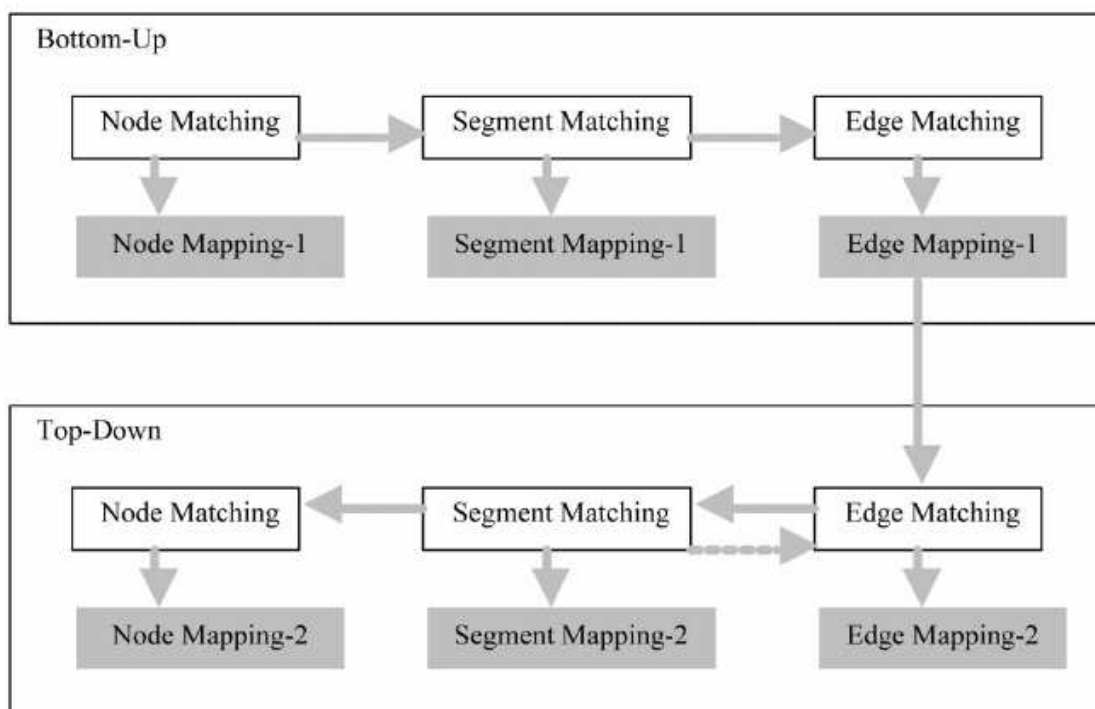
Sono stati pertanto proposti diversi algoritmi ([88]) aventi lo scopo di instaurare in maniera automatizzata tale corrispondenza. Queste procedure si differenziano sostanzialmente in base alla tipologia dell'oggetto geometrico preso a riferimento nel confronto fra le due reti. Si constata la presenza, infatti, di procedure basate sul confronto dei nodi (node matching), o dei segmenti che costituiscono gli archi (segment matching), oppure degli archi nel loro complesso (edge matching). Il node matching consiste nel confrontare i nodi delle due reti sulle base delle distanze misurate fra questi e dell'ampiezza degli angoli formati dagli archi in essi incidenti.

Il segment matching prende in considerazione i segmenti degli archi e può permettere di ottenere risultati migliori rispetto al node matching soprattutto nel caso in cui in una rete siano presenti dei nodi che, invece, sono assenti nell'altra.

Il segment matching, invece, è basato sulla valutazione delle distanze fra i segmenti delle due reti, dei rispettivi angoli e delle lunghezze dei segmenti stessi. La valutazione delle differenze degli angoli e delle distanze costituiscono misure dirette di due aspetti della corrispondenza, mentre la valutazione delle lunghezze dei segmenti permette di effettuare un confronto che implicitamente considera entrambi questi due aspetti.

Nel caso dell'edge matching la valutazione delle differenze degli angoli, delle distanze e delle lunghezze viene compiuta a livello più aggregato, ossia riferendosi agli archi.

Tali procedure possono eventualmente essere integrate come diverse fasi di un processo complessivo, riportato in Figura 2-12, che permetta di pervenire ad un miglior risultato finale.



**Figura 2-12 - Schematizzazione di una metodologia integrata di network matching. Fonte:[88].**

Tale processo prevede una prima fase che, mediante un approccio di tipo *bottom-up*, che parte da un raffronto effettuato sui nodi delle due reti. Successivamente la corrispondenza viene instaurata prima fra i segmenti corrispondenti e poi fra gli archi. In tale fase si possono agevolmente associare gli archi corrispondenti a nodi di cui si abbia perfetta corrispondenza nelle due reti. I casi in cui non si riscontra tale condizione possono quindi venir risolti mediante la successiva fase che, mediante una procedura di

tipo *top-down*, parte dal raffronto diretto degli archi per pervenire alla fine all'associazione a livello di nodo.

#### **2.4.2 Algoritmi di map matching per applicazioni tradizionali ed innovative (ITS)**

Numerose applicazioni di sistemi di trasporto intelligente (Intelligent Transportation System: ITS), come applicazioni di ausilio nella scelta del percorso, gestione di flotte, informazioni all'utenza in merito all'arrivo di veicoli del servizio di trasporto pubblico, necessitano, per la loro attuazione, di informazioni, perlopiù in tempo reale, sul posizionamento dei dispositivi o mezzi utilizzati nel sistema.

Tali applicazioni richiedono un'accuratezza del dato sul posizionamento orizzontale tale che l'errore sia contenuto entro un intervallo il cui valore massimo varia, a seconda del tipo di applicazione, da 1 m a 40 m (nel 95% dei casi).

Le tecnologie GPS sviluppatesi negli ultimi anni permettono di soddisfare in molti casi tali esigenze; inoltre possono essere supportate mediante dati forniti da odometri e giroscopi, installati a bordo dei veicoli, per colmare eventuali lacune nella ricezione del segnale GPS<sup>1</sup>.

La procedura di map matching consiste nell'associare il dato sul posizionamento ad una mappa digitale, in genere al fine di identificare il tratto stradale in cui si trova il veicolo<sup>2</sup>.

Gli algoritmi per risolvere i problemi di map matching sono presenti in letteratura in numero cospicuo e riportano differenti approcci, in funzione anche del tipo di scopo per cui sono stati realizzati, che può essere di tipo generale o finalizzato ad una determinata problematica.

---

<sup>1</sup> Il calcolo della posizione richiede infatti la ricezione simultanea del segnale da diversi satelliti. In particolari condizioni (ad esempio nelle valli di montagna o in strade strette con presenza di alti edifici) tale ricezione può risultare problematica, rendendo impossibile la determinazione della posizione. Si parla in tal caso di "effetto tunnel".

<sup>2</sup> Tuttavia in certi casi, che richiedono particolare attenzione, il veicolo non si troverà in transito nella strada (ad esempio nel caso di una sosta ad un parcheggio).

Una differenza fondamentale è legata alle modalità di tale utilizzo, che può essere legato ad un'applicazione tempo reale oppure prevedere l'effettuazione di un'analisi a posteriori.

Il primo caso è quello di maggior interesse per le applicazioni ITS citate in precedenza. L'analisi a posteriori, invece, risulta utile in diversi sistemi per la gestione e l'analisi della rete di trasporto nella suo complesso, come la registrazione dei percorsi effettuati da mezzi del servizio di trasporto pubblico, studi sul tempo di percorrenza ([101], [99]), road pricing ([96], [99]), misura e monitoraggio del livello di congestione ([87], [106], [97]), studi sulle scelte di viaggio ([95], [96], ) e stima dei relativi modelli ([96]).

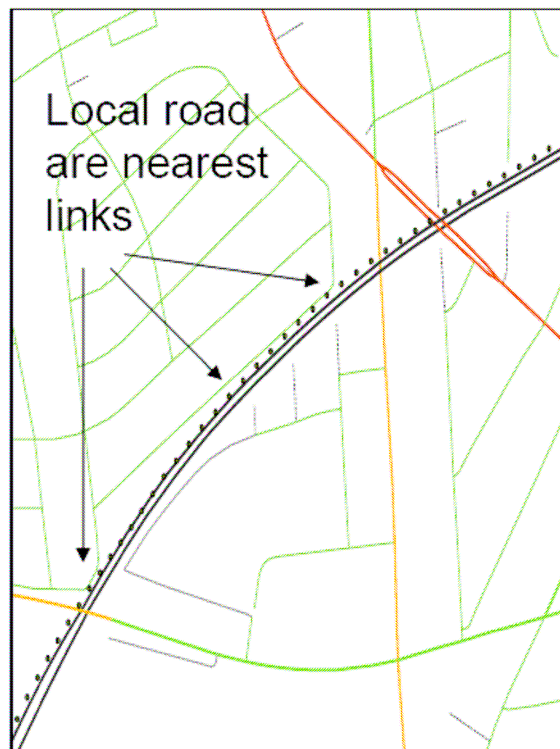
Per quanto riguarda l'implementazione, invece, si possono distinguere essenzialmente quattro tipologie di algoritmi di map matching: geometrici, topologici, probabilistici e facenti uso di altre tecniche avanzate.

Negli algoritmi di tipo geometrico viene utilizzata solo l'informazione costituita dalla forma e posizionamento dei singoli elementi della rete, senza valutare il modo in cui tali elementi sono connessi fra loro.

L'approccio più semplice comporta l'associazione fra ogni punto rilevato dal sensore e il punto della rete più vicino, sia esso un nodo vero e proprio o un nodo di costruzione di un arco della rete stessa. Tale modalità (*point-to-point matching*) risulta di facile implementazione ed utilizzo, tuttavia i risultati possono essere insoddisfacenti e dipendono dalla schematizzazione fatta nella realizzazione della mappa digitale. Infatti un arco realizzato con molti punti di costruzione permetterà una più facile attribuzione dei punti rilevati da un ricevitore GPS.

Un altro approccio prevede di effettuare l'abbinamento fra punti rilevati ed archi della rete (*point-to-curve-matching*). Ogni punto viene quindi associato al più vicino arco della rete, ossia al più vicino segmento della polilinea che rappresenta l'arco. Tuttavia anche tale impostazione presenta degli inconvenienti, soprattutto nel caso di reti urbane in cui, a causa della densità della rete, può diventare instabile. Del resto, non sempre l'arco più vicino risulta essere quello corretto, soprattutto in considerazione del fatto che la schematizzazione della via mediante il proprio asse elimina la dimensione trasversale della strada. Pertanto, spesso in corrispondenza di incroci i punti rilevati vengono attribuiti agli archi che intersecano trasversalmente quello su cui effettivamente si è spostato il ricevitore. Un altro esempio tipico, in tal senso, è costituito da strade fra loro

parallele. Infatti, soprattutto nel caso di carreggiate a molte corsie, l'asse della strada parallela può risultare più vicino al punto rilevato, rispetto a quello della strada effettivamente percorsa (Figura 2-13).



**Figura 2-13 - Esempio di punti rilevati da ricevitore GPS in cui si ha maggior vicinanza all'asse di una strada parallela a quella effettivamente percorsa. Fonte [98].**

Un ulteriore approccio si basa sull'analisi di similarità fra la curva che rappresenta la strada e quella che è costituita dalla successione dei punti rilevati (*curve-to-curve-matching*). La curva rappresentativa della strada percorsa lungo la mappa viene ipotizzata sulla base di una procedura del tipo *node-to-node-matching*. Successivamente essa viene paragonata con quella corrispondente alla sequenza dei punti rilevati, che permette di effettuare una verifica e scegliere fra ipotesi alternative di attribuzione.

Gli algoritmi di tipo topologico utilizzano, oltre alle informazioni sulla geometria degli archi, anche quelle inerenti alle relazioni fra le entità geometriche (punti, linee, poligoni) presenti nelle mappe digitali. Pertanto nell'identificazione del percorso sulla rete si sfrutteranno, in tal caso, le informazioni sulle possibilità di svolta e connessione fra successivi archi lungo il percorso.

Eventualmente ci si potrà avvalere anche di dati sulla velocità e direzione del moto ottenute dal ricevitore; tuttavia tali informazioni devono essere impiegate con cautela perchè sono suscettibili di errori rilevanti, soprattutto in particolari condizioni (come nel caso di spostamenti a basse velocità).

Pertanto l'algoritmo di map-matching dovrà considerare diversi elementi, ognuno dei quali sarà caratterizzato da un proprio peso, nell'identificazione del percorso.

Gli algoritmi di tipo probabilistico prevedono la realizzazione di una regione di confidenza, di forma ellittica o rettangolare, attorno ai punti rilevati dal sensore. La dimensione di tale regione va determinata sulla base degli errori associati ai dati ottenuti dal ricevitore e alla qualità della mappa digitale.

Una volta identificati in tal modo i segmenti su cui è probabile che sia avvenuto il transito, la determinazione del risultato finale viene condotta sulla base di criteri analoghi a quelli già accennati in precedenza (rotta percorsa, collegamento fra gli archi e vicinanza ai punti rilevati).

Un affinamento della procedura, proposto recentemente ([100]), richiede la determinazione della regione di confidenza solo in corrispondenza di incroci. Infatti la sua individuazione risulta inutile, se non controproducente, fintantoché viene percorso un arco senza bivi; il rischio in tali casi è di andare a scegliere un arco non collegato a quello effettivamente percorso che si trova vicino ad esso.

Svariate altre tecniche di tipo avanzato sono state proposte ed utilizzate per la effettuazione del map-matching. Tali algoritmi si avvalgono di diverse teorie e concetti, come ad esempio il filtro di Kalman, la logica fuzzy o l'inferenza bayesiana.

Uno studio comparativo dei diversi approcci e algoritmi nella soluzione del problema di map-matching ([102]) ne ha valutato i risultati. In tale analisi l'utilizzo della logica fuzzy è risultato l'approccio migliore.

Gli aspetti critici, sui quali si dovrà concentrare il processo innovativo sono molteplici. Tali punti critici riguardano innanzitutto l'attribuzione dell'arco iniziale del percorso. Inoltre la determinazione dei valori di soglia (come quelli usati per determinare la regione di confidenza negli algoritmi di tipo probabilistico) o dei pesi dei parametri (ad esempio quelli utilizzati negli algoritmi di tipo topologico) deve tener conto

dell'influenza di condizioni peculiari, quali la tipologia di rilevatore o la morfologia specifica delle rete su cui si opera.

La presenza di intersezioni può comportare difficoltà, soprattutto nel caso di elaborazioni in tempo reale. Un apporto significativo, soprattutto in tali casi, potrà essere costituito da un ricorso sempre maggiore ad informazioni articolate sulla morfologia e regolazione della rete, come indicazioni sulle quote, sensi di marcia, divieti di specifiche manovre e canalizzazioni.

Si osserva poi che le applicazioni legate all'analisi e gestione della rete di trasporto nel suo complesso, pur non essendo complicate dalla necessità di produrre un risultato in tempo reale, comportano delle problematiche particolari, che non sempre vengono risolte in maniera efficace da algoritmi sviluppati per un utilizzo di altro tipo ([94]).

Fra tali esigenze specifiche vi sono ([98]):

- Esigenza di conoscere l'intero percorso effettuato, a volte con bassi livelli di tolleranza negli errori (ad esempio nel caso del road pricing);
- Impatto dei tempi di elaborazione dovuti alla notevole mole di dati da analizzare.

Per quanto riguarda la quantità dei dati da analizzare si cita, ad esempio, il caso dell'esperimento di road pricing effettuato a Copenhagen, che comprendeva l'analisi di 500000 percorsi, corrispondenti a 250000000 punti GPS da attribuire ad una rete di 300000 archi (Nielsen, 2004).

In tal caso si è verificato che un approccio promettente consiste nell'utilizzo di un procedimento che consideri diverse ipotesi percorso, fra cui individuare poi quella corretta. Tali ipotesi vengono costruite iterativamente considerando sia la sequenza dei punti rilevati dal GPS, sia le relazioni topologiche fra gli elementi della rete (Marchal et al., 2004).

Si osserva, infine, che uno sviluppo ulteriore delle procedure di map matching sarà in futuro agevolato dall'evoluzione dei sistemi GPS e reso necessario dallo sviluppo dei sistemi ITS.

Nella valutazione dei risultati si deve infine considerare che anche la qualità dei dati che costituiscono la mappa digitale esercita un ruolo fondamentale, pertanto futuri sviluppi in tal senso condurranno ad un miglioramento dei risultati delle procedure di map-matching.

Del resto, come si vedrà nel capitolo seguente, nel campo delle mappe digitali sono già in fase di sviluppo nuovi standard e nuovi prodotti, che prevedono un contenuto informativo più ricco sia in termini quantitativi che qualitativi.



### **3 MODELLI DI DATI E FONTI INFORMATIVE PER LA RAPPRESENTAZIONE DELL'OFFERTA DI TRASPORTO**

L'ingegneria dei trasporti si configura come un'ingegneria di sistema che ha per oggetto l'analisi di elementi collocati spazialmente nel territorio; risultano quindi evidenti le potenzialità, a tale scopo, di strumenti efficienti per la gestione di dati dotati di attributi geografici (riferimento territoriale), quali i sistemi informativi geografici.

Si riscontrano infatti, sia nella letteratura che nella pratica professionale numerosi esempi di tali utilizzi. Nel presente capitolo verrà fatto riferimento all'utilizzo dei sistemi informativi geografici a supporto della modellizzazione dell'offerta di trasporto. Nello sviluppo della struttura di un sistema informativo, al fine di poter usufruire di fonti di dati ampiamente disponibili, occorre prendere in considerazione alcuni standard per la definizione di informazioni relative a reti di trasporto.

Nei seguenti paragrafi verranno quindi analizzati gli standard che regolano le informazioni di interesse per la modellizzazione dell'offerta di trasporto privato e pubblico. inoltre, nel caso del trasporto privato, sarà fatto riferimento ad alcune fonti di dati disponibili che si basano su tali standard.

### ***3.1 L'utilizzo dei sistemi informativi per la modellizzazione dell'offerta di trasporto privato***

Per quanto riguarda la descrizione della morfologia della rete di trasporto privato, nel seguito verranno considerate le indicazioni fornite dal decreto ministeriale 1 giugno 2001 [21], che a loro volta si rifanno al documento GDF 3.0 del CEN [7].

Verranno quindi descritti un esempio di banca dati commerciale che recepisce tale standard fornendo una fonte dati disponibile sul mercato e aggiornata regolarmente ed effettuata una valutazione delle possibilità da essa offerte per le finalità del presente studio.

#### **3.1.1 Geographic Data Files (GDF)**

Lo standard denominato "Geographic Data Files" (GDF) è stato preparato dal Working Group 7.2 del Comitato Tecnico 728 del CEN, con lo scopo di migliorare l'efficienza nella creazione, scambio ed utilizzo di informazioni geografiche relative alle reti stradali, con particolare riferimento al loro uso mediante strumenti informatici e telematici standard.

Lo standard definisce (vedi [8] p.8):

- 1) un modello di riferimento per la definizione delle informazioni relative alle reti stradali, ed in particolare un modello dati ed un dizionario nel

quale sono descritte le diverse componenti informative e le loro relazioni;

- 2) una specifica delle modalità di rappresentazione dei componenti informatici contenute;
- 3) una specifica dei metadati che devono accompagnare le informazioni geografiche;
- 4) una specifica relativa al formato di interscambio dati che riflette il modello di riferimento definito.

Le informazioni contenute in un G.D.F. sono riferite a ENTITA'(FEATURES), ATTRIBUTI (ATTRIBUTES) e RELAZIONI (RELATIONSHIPS).

Le entità rappresentano gli oggetti (strade, edifici, ponti), le cui proprietà sono descritte dagli attributi. Proprietà che coinvolgono più entità sono chiamate relazioni.

Il modello GDF. raggruppa le entità in undici temi tra cui particolarmente interessanti per i presenti scopi sono: “Strade e Connessioni con altri modi di trasporto” (Road and Ferry), “Ponti e Gallerie” (Brunnels), “Trasporti Pubblici” (Public Transport)

All’interno dei tali temi le entità vengono descritte attraverso una struttura organizzata su tre LIVELLI (LEVELS).

Il primo livello (livello 0) è un livello di tipo cartografico. In esso le diverse entità sono rappresentate dalle primitive geografiche "Nodo", "Arco" e "Superficie", riconducibili ad una "geometria". Le curve vengono descritte come una sequenza ordinata di punti intermedi. Ogni coppia di nodi consecutivi individua un segmento.

Nel secondo Livello (livello 1) viene descritta la mappa in termini di entità elementari. Nel caso del tema “Strade e Connessioni con altri modi di trasporto” esso comprende:

- 1) Elemento Stradale (Road Element)
- 2) Giunzione (Junction)
- 3) Area di traffico (Enclosed Traffic Area)

Un elemento stradale è sempre compreso tra due giunzioni. Una giunzione rappresenta il punto nel quale convergono due o più elementi stradali o il punto in cui un elemento stradale si connette ad un'area di traffico o ad un'altra modalità di trasporto.

Questo secondo livello viene assunto come base di riferimento per gli elementi del Catasto.

Il terzo livello (livello 2) è un'aggregazione (o composizione) di entità elementari messe in relazione fra loro. Pertanto definisce le entità di tipo più complesso quali, nel caso del tema relativo alla rete stradale, la strada (Road) e l'intersezione (Intersection). Una strada e' compresa tra due intersezioni che ne definiscono gli estremi.

Uno degli obiettivi primari considerati nella definizione dello standard è stata la possibilità di utilizzare in maniera combinata le informazioni presenti in sistemi informativi geografici già esistenti all'interno di un unico modello esteso di informazioni relative alle infrastrutture stradali.

Lo standard è oggi usato da diverse fonti informative, soprattutto per quanto riguarda la produzione di database utilizzati da strumenti per la navigazione satellitare, ed in particolare dalla base dati Multinet di Tele Atlas®, utilizzata nel corso della presente ricerca.

#### ***3.1.1.1 Catasto stradale***

Il DM 1 giugno 2001 [22] stabilisce le modalità per l'istituzione del catasto stradale, previsto dal Nuovo Codice della Strada.

Il decreto si rifà in buona parte, per quanto concerne gli aspetti tecnico-informatici allo standard GDF 3.0 [8], e stabilisce anche le modalità di acquisizione dei dati, con particolare riguardo ai sistemi di coordinate geografiche nelle quali devono essere forniti i dati.

In particolare, con riferimento al modello GDF 3.0, nel decreto viene specificato che i temi da archiviare nel catasto stradale sono quelli con codice 41 (roads and ferry) e 75 (ponti e gallerie)

#### **3.1.2 Schematizzazione della rete viaria a partire da una rete gerarchica commerciale**

La schematizzazione della rete di trasporto mediante un grafo costituisce una fase impegnativa e critica nel processo di modellizzazione del funzionamento del sistema di trasporto. A tal fine, l'utilizzo di basi di dati disponibili sul mercato, costantemente aggiornate, può costituire un notevole vantaggio, purchè avvalorato da un'analisi delle esigenze da considerare nel processo di schematizzazione ai fini dell'analisi trasportistica. Ovviamente tali esigenze varieranno a seconda della scala di rappresentazione e della metodologia utilizzata nell'analisi del sistema di trasporto.

Il riferimento comune per tali banche dati costituito dallo standard GDF consente di sviluppare con generalità e sistematicità delle procedure per l'estrazione delle informazioni di interesse ai fini del presente studio.

Considerando il contenuto informativo di una rete gerarchica commerciale (RC), quale in particolare la rete Multinet di Tele Atlas, con riferimento alle necessità tipiche dell'attività di pianificazione e controllo dei sistemi di trasporto si evidenziano, accanto ad elementi di interesse, delle carenze informative (tali reti sono infatti realizzate per finalità specifiche quali ad esempio la navigazione satellitare che non sempre collimano con dette necessità). Le carenze riscontrate nell'utilizzo di tali basi dati commerciali sono sia di tipo strutturale (determinate informazioni non è previsto che vengano archiviate, es. piani semaforici ai nodi), sia legate all'incompletezza dell'informazione (determinate informazioni sono previste ma non sono sempre disponibili) e all'imprecisione (non tutti gli elementi della rete viaria reale sono rappresentati correttamente, es. erronea rappresentazione topologica dei nodi). Nel corso del presente lavoro si è condotta una campagna di verifica nella provincia di Venezia in cui sono state evidenziate tali carenze grazie alla disponibilità di altre fonti informative come il catasto stradale (ancorché non completato per la Provincia di Venezia) e alla conoscenza diretta del territorio.

### ***3.1.2.1 La banca dati Multinet di TeleAtlas***

Fra le informazioni contenute nella banca dati Multinet<sup>1</sup> di TeleAtlas, particolare interesse rivestono, ai fini della presente analisi, quelle relative alle entità di livello 1 che descrivono la rete stradale: jc che contiene le informazioni relative ai nodi

(giunzioni) ed nw, relativa agli archi. Si presentano nelle seguenti tabelle Tabella 3.1 e Tabella 3.2 i relativi campi di maggior interesse, mentre nella seguente figura si riporta una rappresentazione grafica dei due layer, con una mappa tematica basata sul valore di FRC degli archi di nw.

**Tabella 3.1 Campi di interesse presenti nel tema nw.**

<i>FUNZIONE</i>	<i>Tipologia di Strada</i>
ID	Identificativo dell'arco
F_JNCTID	Identificativo della giunzione iniziale
T_JNCTID	Identificativo della giunzione finale
METERS	Lunghezza dell'elemento in metri
FRC	Classificazione funzionale della strada
NET2CLASS	Fornisce una classificazione in quattro livelli di importanza della strada ai fini della scelta di percorso nel contesto in cui è inserita
NAME	Nome della via
ROUTENUM	Designazione amministrativa della strada
FOW	Indica l'appartenza a particolari tipologie di arco
TOLLRD	Indica se la strada è a pedaggio o meno
ONEWAY	Indica se la strada è senso unico ed eventualmente il senso di marcia consentito
KPH	Limite di velocità (in km/h)
MINUTES	Tempo di attraversamento in minuti

**Tabella 3.2 Campi di interesse presenti nel tema jc.**

<i>FUNZIONE</i>	<i>Tipologia di Strada</i>
ID	Identificativo del nodo

Si può notare come i campi F\_JNCTID e T\_JNCTID siano in corrispondenza con il campo ID di jc, consentendo quindi di associare ad un arco i relativi nodi di estremità. Si precisa inoltre che all'oggetto geometrico di nw, costituito da una polilinea è associato un verso convenzionale (che va dal nodo indicato in F\_JNCTID a quello in T\_JNCTID). Tuttavia l'arco reale corrispondente in realtà è bidirezionale; nel caso di un senso unico l'informazione sul verso convenzionale in abbinamento a quella presente in ONEWAY consente di determinare il verso di percorrenza.

Dall'esame di Figura 3-1 si può constatare il notevole livello di dettaglio della rappresentazione della rete stradale.

<sup>1</sup> Si rimanda ai relativi manuali per una descrizione completa del contenuto della banca dati.



**Figura 3-1 – raffigurazione dei layer nw (archi) e jc (giunzioni) di Multinet con tematismo sul campo FRC.**

Molto interessanti sono inoltre le informazioni sulle restrizioni e manovre effettuabili, con riferimento a tali elementi, presenti nelle tabelle MN, MP ed RS.

Il livello 2 della banca dati risulta di eccessivo dettaglio per l'analisi trasportisca, che dovrà pertanto prevedere la realizzazione di un idoneo livello 2, eventualmente mutuando la strutturazione da quello presente nella base dati.

### ***3.2 Modelli di dati standard per il trasporto pubblico***

Nei seguenti paragrafi verrà data una descrizione degli standard europei riguardanti le modalità organizzative dei dati descrittivi il sistema di trasporto pubblico. Le prescrizioni di tali norme sono relative alla modellizzazione dei dati al livello concettuale. Ad un tale livello la descrizione delle modalità organizzative dei dati prescinde da come poi verrà effettivamente implementata (ossia se attraverso diversi file od un singolo database di vario tipo). Pertanto il modello concettuale si ferma a una descrizione, attraverso una definizione chiara ed univoca, delle entità, e relativi attributi,

che caratterizzano il problema. Tali entità vengono presentate evidenziando le relazioni che intercorrono fra esse attraverso lo strumento grafico costituito dal diagramma Entità-Relazioni.

Una descrizione più approfondita, spinta fino alla presentazione della struttura delle tabelle della base di dati, viene invece fornita nella modellazione a livello logico. Infatti la modellizzazione effettuata a quest'ultimo livello tiene conto della reale implementazione scelta per la base dati, ossia del fatto che i dati vengano archiviati su file system oppure su una base dati di una data tipologia (relazionale, a oggetti ecc.)<sup>1</sup>.

### **3.2.1.1 Il modello TRANSMODEL**

Lo standard TRANSMODEL prescrive le caratteristiche di sistemi informativi relativi all'insieme di tutte le informazioni riguardanti la programmazione del servizio di un sistema di trasporto pubblico (TP).

Pertanto il TRANSMODEL norma la strutturazione dei dati relativi alla sola Pianificazione Tattica, mentre la Pianificazione Strategica, richiedendo l'uso di modelli per la determinazione della domanda e di assegnazione della stessa alla rete, necessita di ulteriori dati non presenti nel TRANSMODEL .

La realtà rappresentata dal modello può venire descritta secondo diversi punti di vista, ognuno dei quali rispecchia la necessità di informazioni per un determinato scopo; tali differenti punti di vista vengono detti strutture ("structure"). Pertanto una struttura consiste di un insieme di oggetti utilizzati per descrivere un dominio di dati in vista di una specifica funzione.

Al fine di un utilizzo combinato di informazioni relative a diverse strutture e differenti versioni delle stesse si devono rispettare alcuni requisiti:

- Gestire in maniera coerente le diverse versioni di oggetti di una determinate struttura;
- Georeferenziare, ossia riferire ad un determinato sistema di coordinate spaziali, gli elementi appartenenti ad una determinate struttura;

---

<sup>1</sup> D'altra parte nel modello logico non vengono trattate nel dettaglio le modalità operative di archiviazione e gestione dei dati, essendo tale descrizione invece fornita dalla modellizzazione a livello fisico.



- Gestire e rappresentare in maniera indipendente oggetti appartenenti a differenti strutture.

Nelle pagine seguenti verranno descritte in particolar modo le modalità di archiviazione dei dati relativi alla descrizione della rete e del programma di esercizio (escludendo quindi gli argomenti prettamente inerenti la gestione dell'azienda di TP, come ad esempio la gestione dei turni del personale e delle macchine).

### Descrizione topologica della rete

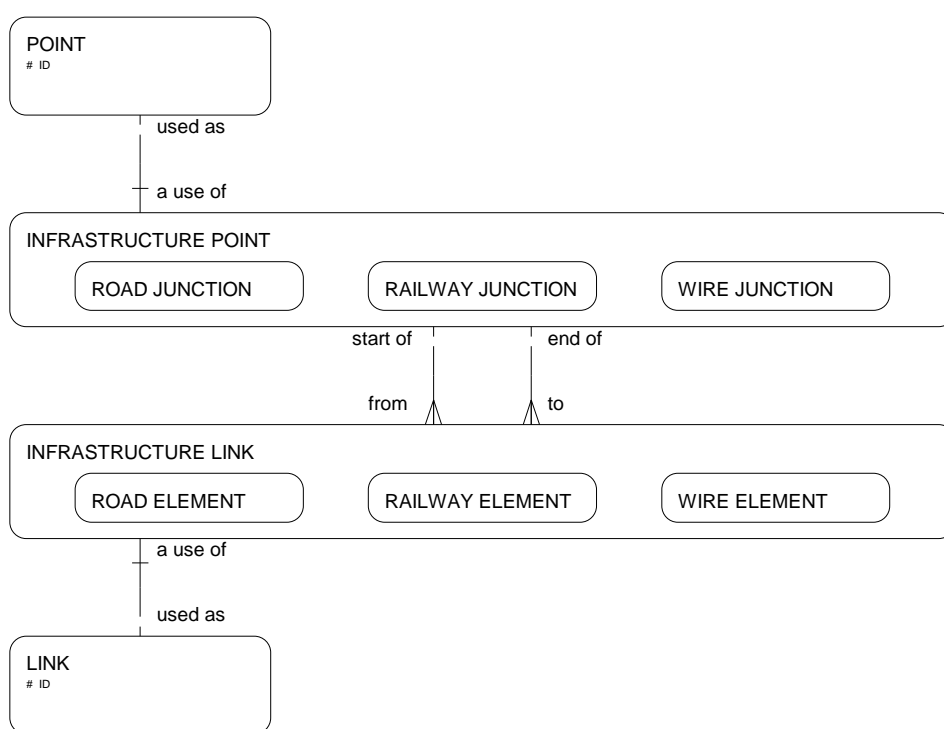
Un elemento fondamentale di un sistema informativo sul TP è costituito dalla rappresentazione della rete in cui viene effettuato il servizio di trasporto. Tale rappresentazione presenta gli oggetti reali che compongono la rete (stazioni, linee, ecc.) attraverso una descrizione topologica, che fa uso di oggetti semplificati come punti, linee e zone.

Occorre inoltre fornire una caratterizzazione spazio-temporale agli elementi costituenti la rete. Per quanto riguarda il tempo infatti sono presenti in genere differenti specificazioni del servizio in funzione del periodo considerato; per soddisfare tali esigenze è stata introdotta l'entità NETWORK VERSION (versione della rete) che viene poi posta in collegamento con l'entità POINT e conseguentemente con tutte le entità basate su POINT (come LINK, ROUTE POINT, ROUTE LINK, TIMING POINT e TIMING LINK).

L'inizio del periodo di validità di una determinata NETWORK VERSION è in genere specificato attraverso una data, espressa tramite una relazione con l'entità OPERATING DAY, che rappresenta un "giornata lavorativa" del sistema di TP, in corrispondenza ad una determinata data del calendario. Per fornire una descrizione spaziale della "struttura" (in questo caso la rete di TP) si può far riferimento invece ad un sistema di localizzazione (LOCATING SYSTEM), che determina inoltre le regole per la rappresentazione grafica.

## Descrizione delle infrastrutture

Un'altra porzione del modello TRANSMODEL è inerente alla descrizione della infrastrutture utilizzate fisicamente nell'effettuazione del servizio di trasporto. Alcuni elementi sono stati presi in prestito dal modello GDF ed integrati nel modello per il trasporto pubblico; del resto lo standard prevede esplicitamente la possibilità di un'interazione con il GDF.



**Figura 3-2 – Diagramma Entità-Relazioni sulle infrastrutture. Fonte: TRANSMODEL.**

Le infrastrutture possono venire descritte attraverso una rappresentazione semplificata mediante punti e archi, in maniera analoga a quanto viene fatto con i percorsi effettuati dal servizio di trasporto pubblico (es. SERVICE LINK). Ciò non significa che le due rappresentazioni debbano essere identiche; al contrario devono mantenersi il più possibile indipendenti per essere messe poi in relazione solo quando necessario attraverso un meccanismo di proiezione.

## Descrizione dell'esercizio

L'offerta di trasporto pubblico è calibrata sui differenti livelli di domanda che si riscontrano in diversi tipi di giorni (ad esempio feriali o festivi, periodo scolastico o non). A tale scopo è stata introdotta l'entità DAY TYPE definite come la combinazione delle varie proprietà (PROPERTY OF DAY) che possono caratterizzare una giornata dal punto di vista dell'esercizio del TP e che influenzano la domanda di trasporto e le condizioni operative (ad esempio il flusso di traffico).

La descrizione delle modalità di espletamento del servizio di TPL avviene mediante delle entità, fra loro gerarchicamente collegate, che vengono sinteticamente presentate nel seguito:

### a) *Line*

Una linea ("LINE") è costituita da un insieme di ROUTE generalmente presentate al pubblico attraverso un unico nome . Le ROUTE componenti una stessa linea sono di solito molto simili dal punto di vista topologico, presentando solo differenze marginali. Un caso classico è costituito dal percorso di andata e di ritorno della linea. A loro volta le LINE possono venir raggruppate in GROUP OF LINES per particolari scopi (PURPOSE OF GROUPING), come ad esempio l'assegnazione ad una certa tipologia di giornata.

### b) *Route*

L'entità ROUTE (instradamento) fornisce una rappresentazione astratta e convenzionale dei percorsi effettuati da un regolare servizio di TP all'interno della rete. Si tratta di un entità lineare composta da una sequenza punti e archi definiti specificatamente allo scopo di identificare univocamente e chiaramente tale percorso.

Pertanto la ROUTE risulta priva dei dettagli atti a descrivere esplicitamente il percorso in termini di elementi infrastrutturali utilizzati (ROAD ELEMENT o RAILWAY ELEMENT) o di modalità operative del servizio effettuato (STOP POINT). Il suo scopo precipuo infatti è quello di fornire uno strumento per lo scambio di dati tra i diversi layer (ad esempio quelli relativi alla pianificazione operativa e quelli inerenti alla descrizione delle infrastrutture)

Per definire una ROUTE si utilizzano le entità ROUTE POINT ed i ROUTE LINK descritte in precedenza, che sono state introdotte nel modello proprio in vista di tale utilizzo. Più precisamente una ROUTE consiste in una LINK SEQUENCE, I cui POINT ON ROUTE sono una lista ordinata di ROUTE POINT<sup>1</sup>.

Opzionalmente, e soprattutto per ragioni di compatibilità con altri modelli (come il GDF), si può introdurre il requisito che non vi sia sovrapposizione fra due diversi ROUTE LINK.

### c) *Working Patterns*

La pianificazione dell'offerta richiede la definizione dei “working patterns” (descrittivi le “varianti” del servizio) relativi allo svolgimento del servizio TP che, per una data ROUTE, in genere viene attuato in diversi modi; ad esempio può variare il numero delle fermate effettuate su di uno stesso percorso oppure si può utilizzare una diversa sequenza di TIMING POINT per lo scheduling.

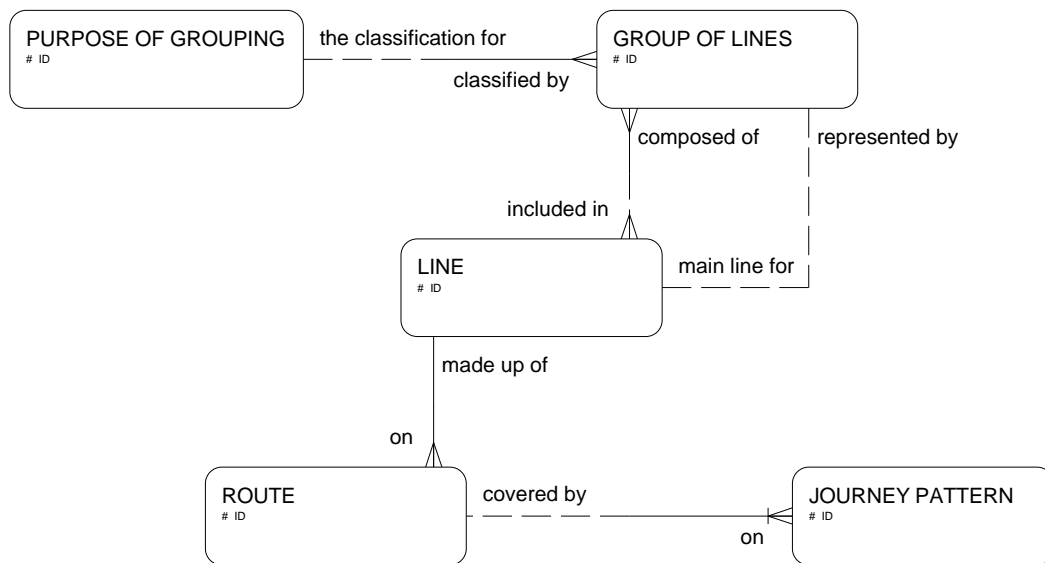
Tali “working pattern” sono composti da:

- Una sequenza di STOP POINT<sup>2</sup>;
- Una sequenza di valori di tempi di percorrenza, attraverso una serie di TIMING POINT delimitanti TIMING LINK, sui quali sono specificati i tempi di percorrenza.

L'entità SERVICE PATTERN specifica tali insiemi di STOP POINT, mentre TIMING PATTERN descrive i tempi di percorrenza. Infine il complesso di tali informazioni, che definiscono il “working pattern”, viene archiviato in JOURNEY PATTERN.

---

<sup>1</sup> Ovviamente ogni POINT ON ROUTE Deve essere collegato al successivo della lista da un ROUTE LINK.



**Figura 3-3 – Diagramma Entità-Relazioni relativo all’esercizio del servizio di TP. Fonte: TRANSMODEL.**

*d) Corse*

L’entità **VEHICLE JOURNEY** (corsa) definisce lo spostamento di un veicolo in occasione di un certo **DAY TYPE** attraverso uno specifico **JOURNEY PATTERN** su di una particolare **ROUTE**.

**PARTE 3: IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA  
INFORMATIVO A SUPPORTO DELLA  
MODELLIZZAZIONE DELLA DOMANDA E OFFERTA DI  
TRASPORTO**

#### **4 IMPLEMENTAZIONE DELLA BASE DATI E MODELLIZZAZIONE DELLA RETE DI TRASPORTO DELLA PROVINCIA DI VENEZIA**

## **4.1 *Strutturazione della base dati***

Nel presente capitolo viene descritto il processo che ha portato alla strutturazione del sistema informativo della rete di trasporto della Provincia di Venezia.

L'attività di ricerca svolta, descritta nei precedenti capitoli, ha permesso di progettare ed implementare secondo metodologie evolute proprie di ambiti disciplinari trasversali all'ingegneria dei Trasporti (sistemi informativi territoriali) e coerentemente con gli standard normativi attuali (TRANSMODEL e GDF), un sistema informativo a supporto della modellizzazione del sistema dei trasporti delle persone con riferimento ad un ambito territoriale extra-urbano qual'è quello della Provincia di Venezia. L'attenzione è stata rivolta alla componente relativa all'offerta e specificatamente alla sua topologia.

I dati spaziali archiviati nel database hanno utilizzato la struttura object-relational di Oracle, che permette di svolgere efficienti operazioni di interrogazione ed esportazione in vista di differenti utilizzi e mediante molteplici formati, compatibili con diversi software applicativi.

Il sistema informativo si articola in due componenti, una relativa al Grafo della Rete Viaria (GRV) e l'altra dedicata del Grafo del Trasporto Pubblico Locale (GTPL).

La gestione in un'unica base dati del trasporto privato e pubblico permette di scambiare le informazioni e i risultati delle elaborazioni effettuate nei due sottosistemi. Tale interazione è garantita dal riferimento comune agli elementi della base dati Multinet (nel TRANSMODEL stesso del resto è prevista l'interazione e l'integrazione con lo standard GDF).

Attualmente il sistema realizzato, coerentemente con gli obiettivi previsti, è impiegato con successo nelle attività di supporto alle decisioni presso il Settore Mobilità e Trasporti della Provincia di Venezia.

Nei paragrafi successivi verranno descritte le caratteristiche e modalità realizzative dei due sottosistemi che compongono tale sistema informativo.

## **4.2 *La componente relativa al sottosistema di trasporto privato***

La definizione di una struttura di archiviazione dei dati del GRV è stata condotta, tenendo in considerazione gli standard citati in precedenza, in maniera tale da garantire



l'integrazione tra i dati richiesti/forniti dagli strumenti di modellizzazione e la base dati geografica Multinet. Si è così realizzata una strutturazione gerarchica, in cui ad un elemento della schematizzazione del GRV (nodo o arco) corrisponde in generale un insieme di elementi della rete commerciale, che rappresenta in maniera dettagliata la reale rete stradale.

Per realizzare tale struttura si sono utilizzate alcune tabelle della banca dati Multinet che sono state opportunamente modificate ed integrate con altre realizzate appositamente.

Il punto di partenza per la costruzione del nuovo livello 2 (aggregato), relativo al grafo della rete stradale a livello provinciale, è costituito, come già detto, dalle tabelle contenenti le informazioni relative al livello 1 (dettagliato): NW per gli archi e JC per le giunzioni. Informazioni utili sono contenute inoltre nelle tabelle MN ed MP descrittive le manovre e gli eventuali divieti connessi.

Per le applicazioni prese in considerazione il grafo dovrà essere orientato e pertanto si dovrà passare dagli archi bidirezionali (in genere) di Multinet ad archi unidirezionali. A tal fine, in via preliminare, sono state effettuate delle opportune modifiche che hanno portato alla realizzazione della tabella NW\_DIR, i cui elementi corrispondono agli archi del livello 1 resi unidirezionali.

Le tabelle IG e 2R\_PATH permettono di passare alle entità di livello 2, intersezioni e strade rispettivamente. Il livello 2 nella banca dati Multinet è stato realizzato per finalità differenti rispetto a quelle della modellizzazione trasportistica e quindi risulta essere di eccessivo dettaglio. Nel corso del presente studio è stato analizzato ed aggiornato il modello di rete della Provincia realizzando un livello 2 idoneo a tale scopo.

Le tabelle IS e LNW descrivono le entità di livello 2: intersezioni e strade rispettivamente.

Le intersezioni possono essere formate anche da numerosi archi (o giunzioni). È quindi opportuno ricostruire anche i percorsi che vengono effettuati al loro interno. Ciò è reso necessario anche dall'esigenza di evidenziare quelle situazioni in cui non si possa immettersi in un determinato arco uscente dall'intersezione provenendo da un dato arco entrante.

A tal fine sono state realizzate le tabelle LMN e LMP, che presentano una struttura in parte analoga, rispettivamente, a quella di MN e MP, pur operando ad un maggiore livello di aggregazione.

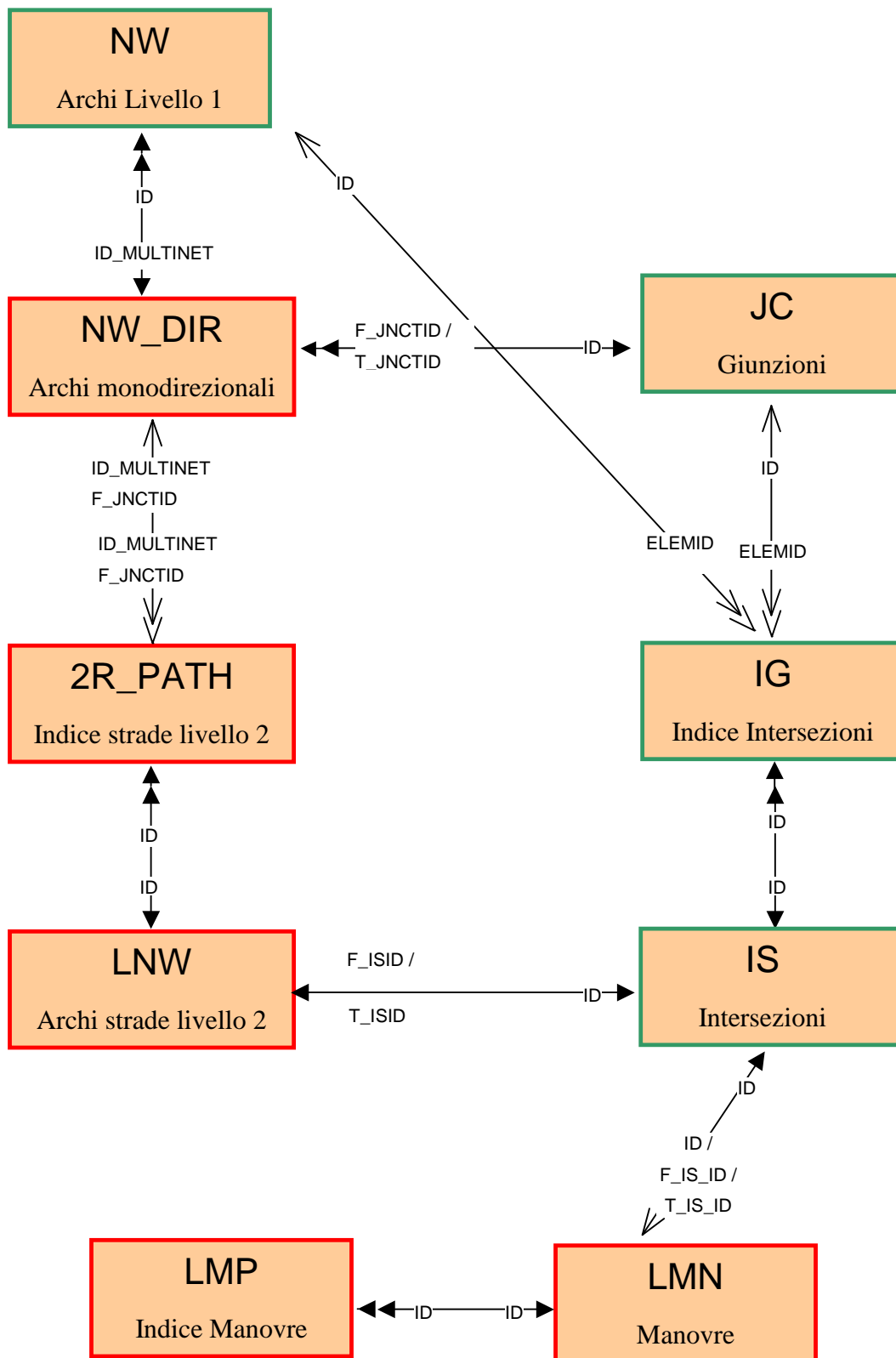


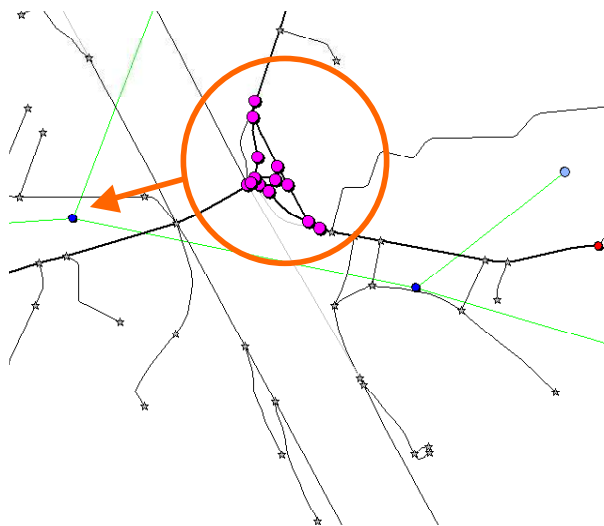
Figura 4-1 - Tabelle e relazioni descriventi la rete stradale nel nuovo livello 2 della base dati.

#### 4.2.1 Le procedure per il popolamento delle tabelle e l'interazione con la base dati

Una volta definita la struttura delle tabelle si è passati alla fase di popolamento delle stesse in modo da attribuire le informazioni presenti nella banca dati al grafo della rete viaria (GRV), permettendone così, tra l'altro, la georeferenziazione.

Il primo passaggio per definire una corrispondenza tra la rete dettagliata di Multinet ed un grafo aggregato, quale il GRV che si intende costruire, è quello di stabilire la corrispondenza tra i nodi di questo grafo aggregato e gli elementi della rete dettagliata. La mappatura è avvenuta utilizzando strumenti grafici (*Mapinfo*) e sviluppando delle procedure specifiche (in linguaggio *MapBasic*), che attraverso un'integrazione dell'interfaccia grafica del programma permettono di effettuare tale associazione, mediante la selezione manuale per ciascun nodo del GRV dei corrispondenti nodi *Multinet* e la successiva archiviazione automatica della corrispondenza nella tabella IG.

Nella figura seguente si può vedere un esempio relativo ad un'intersezione i cui elementi corrispondenti selezionati vengono evidenziati in color porpora dal programma.



**Figura 4-2 - Esempio di identificazione dei nodi di una intersezione mediante la procedura sviluppata in MapBasic.**

Successivamente si è realizzato un programma in Java che implementando l'algoritmo di Dijkstra dei percorsi minimi, permette di individuare la sequenza di elementi di livello 1 che costituiscono il collegamento tra due intersezioni, rappresentato da un arco del grafo nella schematizzazione del modello di rete. Le figure seguenti illustrano il funzionamento del programma mostrando alcuni aspetti della propria interfaccia. Si possono notare in rosso gli elementi del livello 1 corrispondenti a nodi del grafo ed in verde quelli corrispondenti alla strada di livello 2 in esame. In tal modo è stato possibile attribuire agli archi le caratteristiche relative ai rispettivi elementi della banca dati riempiendo così la tabella LNW. Un procedimento analogo ha permesso infine di costruire i percorsi minimi interni alle intersezioni, andando a popolare le tabelle LMN ed LMP. Ciò ha permesso anche l'aggiornamento della tabella LNW in maniera da tener in qualche modo conto dei percorsi interni alle proprie intersezioni di estremità, alle quali, essendo schematizzate come entità puntuali, non può essere attribuito un percorso e relativo perditempo.



**Figura 4-3 - Esempio di utilizzo della procedura Map Basic per l'identificazione degli elementi di corrispondenza tra le reti di livello 1 e 2. Passo 2: visualizzazione degli elementi corrispondenti.**

Alternativamente, attraverso l'interfaccia grafica, in ambiente *Mapinfo*, grazie a procedure specifiche (anch'esse sviluppate in linguaggio *MapBasic*) è possibile effettuare, mediante selezione manuale, l'associazione ed archiviazione automatica della corrispondenza nella 2R oppure verificarla visivamente.

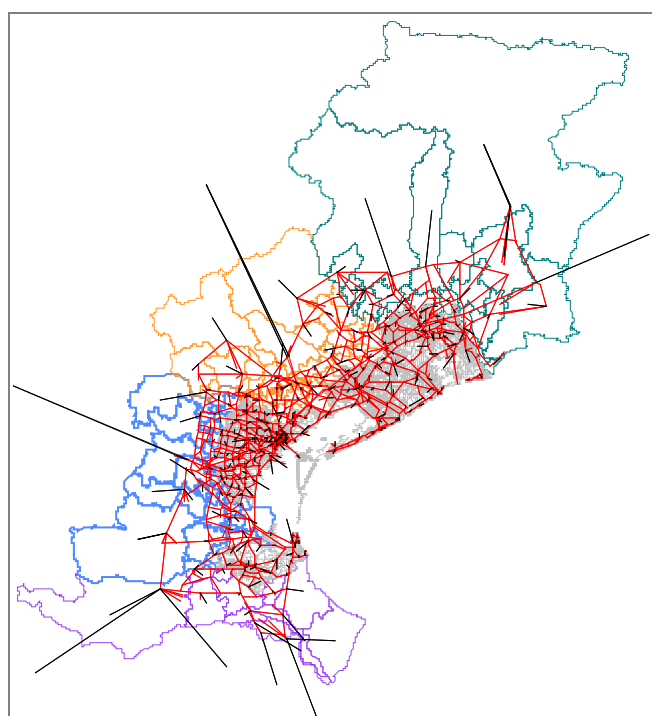
Un ulteriore sviluppo è stato rappresentato dalla messa a punto di strumenti che

velocizzino ulteriormente tale processo, consentendo l'estrazione automatica del grafo dalla rete rappresentata dalla base dati Multinet. Tale grafo dovrà poi essere soggetto ad opportuna validazione, ad esempio attraverso le funzionalità di visualizzazione e modifica manuale viste in precedenza.

Nella tabella che segue sono riportati sinteticamente i dati relativi ai due grafi posti in relazione e in Figura 4-4 è mostrato il GRV implementato con riferimento all'intero ambito territoriale considerato.

**Tabella 4.1 - Corrispondenze tra il GRV e la Multinet. Dati di sintesi.**

	<i>Multinet</i>	<i>GRV</i>
Numero di nodi	510.000	2.687
Numero di archi	580.000	7.534



**Figura 4-4 - Grafo della provincia di Venezia.**

Come già detto, differenti esigenze di analisi e rappresentazione portano a differenti

livelli di schematizzazione, che tuttavia sono riferiti ad una stessa rete di trasporto. Il fatto di poter mettere in relazione fra loro tali schematizzazioni permette di conseguire notevoli vantaggi. Infatti è possibile sia mettere a confronto i risultati di analisi relative a differenti schematizzazioni, sia utilizzare informazioni già archiviate (es.: sviluppo incrementale del modello), dovendo adottare una nuova schematizzazione.

Un GIS del tipo implementato infatti permette di impostare in maniera organica ed unitaria le varie schematizzazioni ed elaborazioni relative ad uno stesso contesto territoriale. La gestione della coesistenza di diverse reti e scenari di valutazione della stesse nella base dati è stata garantita attraverso due livelli di flessibilità. Un primo livello è legato a diversità di estensione geografica di differenti schematizzazioni. Ad esempio, confrontando due reti in cui l'una rappresenti l'ampliamento ad un ambito geografico più vasto dell'altra, si avrà che alcuni archi risulteranno in comune fra le due rappresentazioni, mentre altri apparterranno solamente ad una delle due. Per questo motivo sono state realizzate apposite tabelle che registrano l'appartenenza di archi e nodi alle varie reti presenti nella base dati.

Per garantire e gestire la coesistenza di tali schematizzazioni, aventi elementi in comune, si sono dovute sviluppare una serie di funzionalità, attraverso una serie di trigger o "regole attive". Tali funzionalità comportano l'effettuazione di una serie preordinata di operazioni in maniera automatica, in seguito alla modifica da parte dell'utente (attraverso l'interfaccia in ambiente Mapinfo) di alcune tabelle del GRV. Tali operazioni garantiscono il mantenimento della coerenza fra le diverse rappresentazioni, attraverso l'aggiornamento simultaneo di elementi comuni nelle diverse reti ed il rispetto di prefissati vincoli fra le tabelle della base dati.

Un altro livello di flessibilità è quello relativo all'aggiunta di alcuni elementi ad una rete, legati perlopiù a valutazioni di scenario. Infatti gli elementi suscettibili di essere aggiunti o tolti, a seconda dello scenario futuro o ipotetico considerato, vengono caratterizzati da un valore opportuno in un apposito campo della tabella LNW; in tal modo è possibile prenderli in considerazione o meno come elementi aggiuntivi della rete, che peraltro rimane invariata ed unica. Inoltre, si evita il problema di dover riportare gli aggiornamenti fatti sulla rete dello stato attuale anche su una (o più) eventuale rete di progetto ogniqualvolta si abbiano da fare delle modifiche (ad esempio in corrispondenza all'aggiornamento della base dati Multinet), in quanto si tratta essenzialmente della stessa rete.

Una soluzione di questo tipo è stata adottata per l'ampliamento del grafo della Provincia di Venezia, giungendo alla costruzione di un sistema informativo in cui coesistono differenti grafi, con diversi scenari futuri di progetto, che condividono in parte gli stessi elementi. Tali esigenze inoltre sono particolarmente rilevanti nella costruzione del grafo del trasporto pubblico (di cui si dirà nel seguito), che nella presenta ricerca prende le mosse da quello del trasporto privato.

Il riferimento comune alla base dati Multinet permette l'associazione immediata di tutte le informazioni, provenienti da fonte esterna, che vengano attribuite ad elementi della banca dati. Un esempio di ciò si ha per quanto riguarda il risultato dei rilievi di traffico effettuati sul campo, che vengono in prima istanza attribuiti ad archi di nw e poi, conseguentemente, anche a tutti gli archi corrispondenti, presenti nelle diverse schematizzazioni.

Un ulteriore sviluppo della base dati è stato in un certo senso mutuato dalla strutturazione del modello dati del trasporto pubblico, in cui vengono archiviate separatamente le informazioni sulla topologia e sulle funzionalità del servizio effettuato. Nel caso del trasporto privato si è pensato di poter descrivere attraverso diverse modalità (ad esempio diverse funzioni di costo) le caratteristiche funzionali di uno stesso arco. Si ottiene tale risultato ponendo la tabella LNW in relazione uno-a-molti con una tabella che archivia le valutazioni sulla funzionalità degli archi (LNW\_FDC).

Una volta realizzata la corrispondenza fra gli elementi della schematizzazione e quelli della banca dati, ci si trova nelle condizioni di poter sfruttare appieno, ai fini dell'analisi trasportistica, le potenzialità di uno strumento quale il DBMS nella fornitura, organizzazione ed estrazione di informazioni dai dati. In tale direzione è stata diretta la presente ricerca, nella sua seconda ed ultima fase.

Spesso infatti risulta problematico l'approvvigionamento degli elementi che molti modelli richiederebbero per poter essere utilizzati in modo corretto; per ovviare a ciò, è possibile provare a surrogare tali informazioni mancanti o con altri dati disponibili (facendo ricorso ad altre modellizzazioni dell'interazione fra domanda ed offerta nella rete di trasporto), oppure cercare di ricostruire il legame presente fra le grandezze richieste e quelle effettivamente disponibili.

In tal senso le banche dati mettono a disposizione una serie di informazioni sugli elementi della rete; alcune sono immediatamente utilizzabili (come ad esempio la lunghezza degli archi), altre invece richiedono preliminarmente, per essere impiegate,

un processo di valutazione del loro legame con le grandezze e le scale di misurazione solitamente utilizzate nella modellizzazione (es. classificazioni funzionali degli archi sulla base di alcune scale convenzionali presenti in Multinet).

Tra le informazioni più facilmente ricavabili vi sono elementi quali la categoria funzionale dell'arco, la tortuosità, la presenza di elementi di disturbo derivanti dal contesto in cui l'arco è inserito (es. aree urbane), il numero e tipo di archi secondari che si intersecano lungo il tragitto dell'arco e alle intersezioni di estremità.

Particolarmente rilevanti sono, in tal senso, i benefici che derivano dalla possibilità di collegare dati riguardanti elementi rappresentativi di diverse entità poste in relazione fra loro. Detta relazione può essere basata su campi alfanumerici di una tabella o derivare da rapporti di mutuo posizionamento spaziale. Le relazioni citate risultano di particolare interesse laddove si intenda costruire un modello di offerta in cui le funzioni di costo siano non separabili.

Uno dei vantaggi dell'utilizzo della rete Multinet è costituito dal fatto che essa viene aggiornata regolarmente. Ciò comporta, d'altra parte, l'esigenza di effettuare un'operazione di network matching in occasione del rilascio di ogni nuova versione della banca dati, in quanto la corrispondenza con la rete schematizzata deve essere ricondotta agli elementi della nuova versione di Multinet. Si è constatato che la corrispondenza fra gli elementi di versioni successive di Multinet risulta solo parzialmente esplicitato mediante campi alfanumerici. Pertanto sono state implementate procedure di network matching che instaurano tale corrispondenza fra i nodi e quindi successivamente anche fra gli archi delle due versioni. Nel corso dello studio si è evidenziato come tali procedure possano essere efficacemente implementate facendo uso delle funzionalità offerte dagli operatori spaziali presenti in Oracle Spatial.

Per quanto riguarda l'interazione con i diversi software applicativi si sottolinea come l'organizzazione del sistema informativo punti all'integrazione dei vari strumenti disponibili attraverso la centralizzazione e condivisione della base dati. Questo permette di legare input richiesti dai vari software con gli output derivanti da procedure operanti direttamente sulla base dati, o dall'applicazione di altri strumenti esterni.

La possibilità di manipolare le informazioni archiviate in un database consente infatti una traduzione delle stesse in diversi formati utilizzabili per l'interscambio tra diversi sistemi.



La figura seguente illustra a titolo di esempio la presentazione del grafo GRV con alcuni tematismi derivanti dalle caratteristiche degli archi, estratto nel formato KML (Google 2007) e visualizzato nel software Google Earth®.



**Figura 4-5 – Esempio di visualizzazione di un tematismo derivante da parametri funzionali di GRV nel software Google Earth®.**

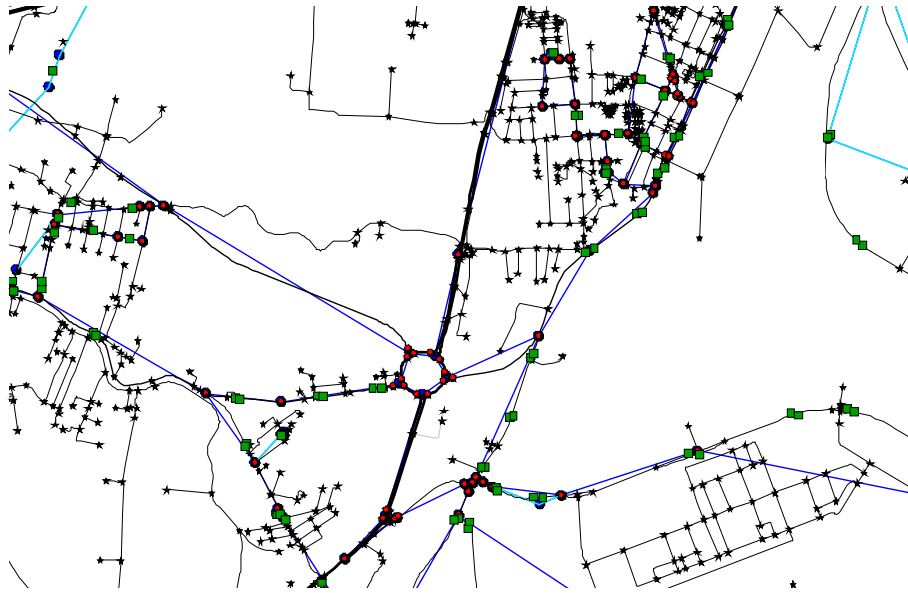
### ***4.3 La componente relativa al sottosistema di trasporto pubblico***

I concetti relativi alla strutturazione delle informazioni relative al sistema di trasporto pubblico, delineati nel precedente capitolo, sono stati messi in atto nella realizzazione della componente relativa al sottosistema del trasporto pubblico della base di dati. Infatti lo sviluppo del relativo modello logico è avvenuta coerentemente con la strutturazione sancita a livello concettuale dal modello TRANSMODEL. Ulteriori elementi di cui si è tenuto conto sono stati la necessità di garantire l'interazione con altri software di proprietà della Provincia (importazione ed esportazione dei dati) e le prescrizioni ed obiettivi stabiliti dal Piano di Bacino (In particolar modo gli standard definiti nel protocollo di intesa per lo scambio di dati con le aziende cui è appaltata l'effettuazione del servizio).

Nella modellizzazione si è adottata una rappresentazione coerente con il contesto extraurbano di analisi e le informazioni disponibili. Si è quindi optato per un “modello per corse” e si è rinunciato alla rappresentazione dettagliata delle fermate e delle diverse

operazioni che si svolgono in esse (salita, discesa, ecc.).

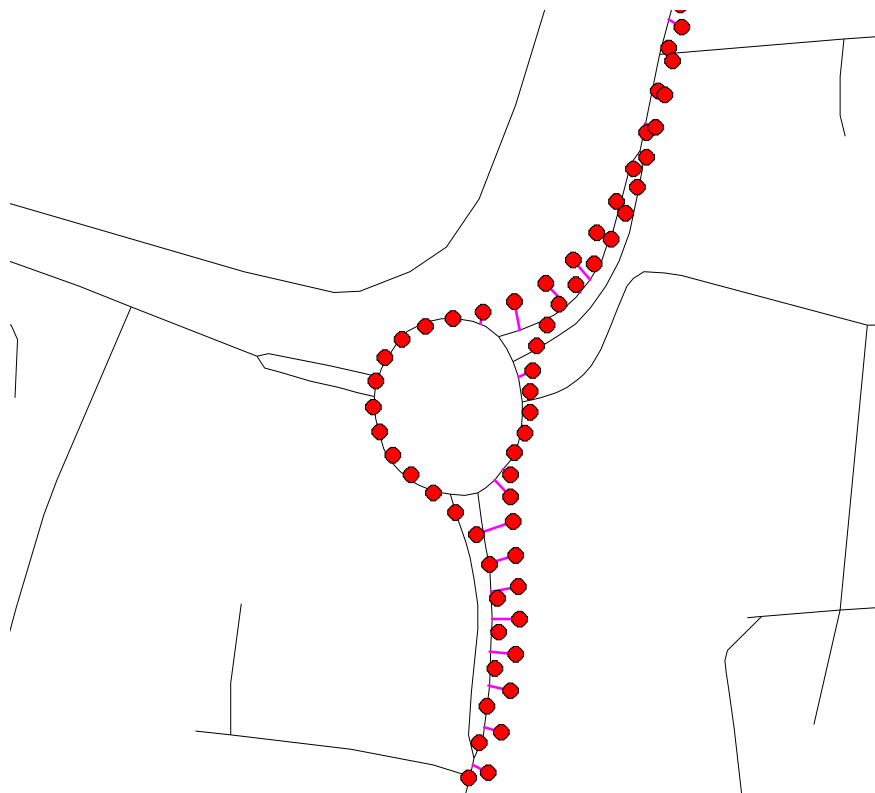
In maniera analoga a quanto fatto nel caso del trasporto privato, è stata instaurata la corrispondenza fra le tratte del trasporto pubblico e gli elementi della banca dati Multinet. Nel fare ciò si è conferito carattere di direzionalità alle tratte del servizio di TPL, consentendo una più efficiente organizzazione dei dati in particolar modo nell'associazione delle fermate e dei percorsi reali, espressi tramite gli archi della tabella NW di Multinet, alle tratte stesse.



**Figura 4-6 - Corrispondenza tra GTPL e gli elementi della rete Multinet.**

Il lavoro di implementazione ha permesso di riscontrare alcune lacune nell'informazione riguardante tali tratte. Pertanto, l'esigenza di ottenere una conoscenza dettagliata dei percorsi effettuati dai veicoli del trasporto pubblico ha portato allo sviluppo di un algoritmo di map matching, basato sull'associazione dei punti rilevati agli archi di TeleAtlas effettuata mediante l'uso degli operatori spaziali di Oracle Spatial. Nell'implementazione la valutazione della distanza dei punti (rilevati dal GPS) dagli archi è stata integrata con controlli sulla connessione nella rete della sequenza degli elementi in tal modo associata alla sequenza punti rilevati. È stato inoltre necessario impostare opportuni criteri per evitare l'associazione dei punti ad archi che intersecano quelli in cui è transitato effettivamente il veicolo.

L'effettuazione di test, come quello riportato in Figura 4-7, ha dato esiti piuttosto positivi.



**Figura 4-7 Esempio di procedura di Map Matching per la ricostruzione delle tratte del servizio di Trasporto Pubblico, mediante punti (in rosso) rilevati da un ricevitore GPS.**

Un ulteriore utilizzo delle procedure di map-matching, seppur di più semplice implementazione, è legato all'attribuzione delle punti rappresentativi delle fermate alle tratte.

Una volta realizzato il popolamento delle tabelle, è stato possibile indagare la possibilità di un utilizzo del sistema informativo per l'estrazione delle informazioni di interesse a partire dai dati archiviati. Per agevolare l'utilizzo di tali elaborazioni sono state sviluppate idonee interfacce in ambiente Mapinfo e collegamenti su altre piattaforme (es. Access), in maniera di garantire un accesso diversificato al sistema informativo.

In particolar modo, non si è tralasciato di indagare le possibilità offerte dal sistema informativo nell'analisi e valutazione di indicatori che permettano di descrivere il servizio svolto, anche ai fini della redazione dei bandi di gara per l'affidamento del servizio stesso.

A tal proposito gli ambiti territoriali del servizio di pertinenza della Provincia sono stati suddivisi in zone definite individuando porzioni di territorio caratterizzate da omogeneità nel servizio e contiguità territoriale.

Successivamente è stato possibile ricavare informazioni relative alle modalità e frequenza del collegamento fra tali zone. Ciò ha comportato elaborazioni sul numero di collegamenti (diretti oppure tramite interscambio) presenti fra le diverse zone, e l'attribuzione di indicatori agli ambiti territoriali in cui si svolge il servizio.

Allo scopo di valutare le possibilità di interscambio si è deciso di associare le fermate poste a brevissima distanza (perlopiù associando le paline relative a direzioni opposte poste sui due lati di una stessa strada), riprendendo il concetto di STOP AREA presente nel TRANSMODEL.

Nel caso del trasporto pubblico risulta particolarmente importante l'integrazione di dati e procedure; ad esempio nella creazione dei protocolli di importazione ed esportazione dei dati è stato necessario interagire sia con le basi di dati delle aziende di trasporto pubblico, sia con i formati utilizzati dai software di simulazione. In tal senso l'interazione con rappresentazioni (o l'esigenza di produrle) in cui le fermate sono presenti come nodi di estremità anziché come punti appartenenti alla tratta, come avviene all'interno del sistema informativo, richiede l'utilizzo frequente di procedure di segmentazione dinamica.

Inoltre il riferimento comune alla base dati Multinet ed il criterio adottato di spezzare le tratte del trasporto pubblico laddove sia presente un nodo del GRV, ha permesso di garantire l'interazione con il GRV ed i risultati delle relative elaborazioni.

## **5 CALIBRAZIONE E ATTRIBUZIONE DELLE FUNZIONI DI COSTO**

Nel presente capitolo vengono presentate le analisi che hanno portato alla calibrazione delle funzioni di costo del grafo della rete della Provincia di Venezia. Saranno innanzitutto presentate le modalità di classificazione funzionale degli archi della rete, basata sull'utilizzo delle informazioni rese disponibili dal sistema informativo descritto nei precedenti capitoli. Successivamente verranno descritte le analisi sperimentali e le procedure di calibrazione della funzione BPR effettuate con i relativi dati.

## **5.1 Suddivisione degli archi della rete in gruppi funzionalmente omogenei**

Nel presente paragrafo viene descritta una procedura di suddivisione dell'insieme degli archi della rete, basata su una classificazione di tipo funzionale. In tal modo risulta relativamente semplice estrarre un campione ristretto di archi da ogni gruppo ed effettuare solo su quest'ultimi la calibrazione delle funzioni di costo, per poi estenderne i risultati all'universo degli archi di ciascuna classe.

La metodologia proposta si basa su un numero limitato di informazioni, che si possono ritenere ampiamente disponibili e aggiornate regolarmente, in quanto presenti in banche dati commerciali come Multinet di Tele Atlas.

Tale procedura è stata sviluppata a partire dai dati propri del sistema informativo descritto nel capitolo precedente in cui gli archi della schematizzazione sono stati posti in corrispondenza con gli archi della banca dati Multinet, rendendo agevole l'utilizzo delle informazioni relative.

Sulla base di queste informazioni (e di altre rappresentazioni del contesto urbanistico disponibili), è stato quindi possibile effettuare una idonea classificazione funzionale degli archi reali della rete (escludendo quindi gli archi fittizi come i connettori), che permette di rendere più efficiente la successiva fase di calibrazione. Infatti in tal modo le caratteristiche degli archi campione su cui si effettua la calibrazione rispecchiano maggiormente le caratteristiche del gruppo di archi a cui verranno attribuiti i risultati.

Occorre tuttavia precisare che, dal momento che la banca dati è stata sviluppata per scopi differenti, in taluni casi si sono riscontrate delle incoerenze e pertanto l'utilizzo delle relative informazioni deve essere effettuato in maniera critica.

Gli archi di infrastrutture a carreggiate separate sono stati considerati a parte e per essi si sono adottati valori dei parametri di calibrazione coerenti con quanto riportato in letteratura, mentre nei rimanenti casi è stata effettuata un'analisi più approfondita.

Per quanto riguarda la caratterizzazione urbanistica gli archi sono stati suddivisi sulla base di una "query" spaziale in cui è stata valutata la percentuale del percorso dell'arco (ossia dell'insieme di archi di  $2r$  corrispondenti all'arco dello schematico) che è contenuta in un area appartenente al layer delle aree edificate, *bu* ("built-up areas"), della banca dati Multinet (sottoposta a verifica mediante altre fonti dati disponibili).

Sono stati pertanto definiti

- “Urbani” gli archi che presentano più del 60% del loro percorso all’interno di un centro abitato
- “Periurbani” gli archi che presentano una percentuale di percorso dentro al centro abitato compresa fra il 30 % ed il 60%
- “Extraurbani” gli archi che presentano più del 60% del loro percorso all’interno di un centro abitato

Un’ulteriore suddivisione riguarda la valutazione delle caratteristiche funzionali degli archi che vengono suddivisi in “Classe A” e “Classe B” sulla base del valore dell’attributo FRC (presente negli archi di *nw* associati all’arco schematizzato cfr. § 4.2.1) in termini assoluti e relativi. Tale attributo fornisce una classificazione degli archi, mediante una scala qualitativa, legata alle caratteristiche morfologiche degli archi stessi; presenta valori da 0 ad 8 (ad esclusione del valore -1 riservato ai casi particolari per i quali non ha significato la classificazione e che non sono rilevanti nella presente analisi) in ordine decrescente di importanza.

Per quanto riguarda la valutazione in termini assoluti, ossia basata solamente sul valore relativo all’arco stesso, nel caso specifico si sono considerati di classe A gli archi con valore di FRC da 1 a 3 (il valore 0 corrisponde in generale alle autostrade) e di classe B gli archi aventi valori superiori a 3 del parametro FRC.

La valutazione in termini “relativi”, invece, è stata effettuata confrontando il valore di FRC dell’arco analizzato con quello degli altri archi che terminano nella sua stessa intersezione finale (operazione agevolata delle funzionalità offerte dal sistema di gestione della base dati). La valutazione in termini assoluti di FRC è da preferirsi nel caso in cui il tempo di running abbia importanza predominante mentre il criterio della valutazione dell’FRC in relazione al valore degli altri archi all’intersezione finale è da preferirsi nel caso si possa ipotizzare che il perditempo al nodo sia una componente rilevante, come nel caso dei contesti urbani o comunque con archi di piccole dimensioni (ossia minori di 1 km).

Una categoria a parte risulta essere quella degli archi extraurbani caratterizzati da notevole tortuosità, ossia in cui questo attributo determina un valore basso di velocità anche per flussi ridotti.

Tali archi saranno caratterizzati da valori molto bassi della velocità anche a flusso nullo e quindi da un valore del parametro  $\alpha$  della BPR parimenti modesto. Tale categoria non

include gli archi urbani in quanto in tal caso l'effetto penalizzante sulle velocità è già determinato dal fatto di attraversare un centro urbano.

La procedura sviluppata per individuare tali archi è stata realizzata a partire dalle informazioni contenute sulle polilinee degli archi di  $n_w$  corrispondenti all'arco.

Per effettuare la valutazione del livello di tortuosità, tali archi sono stati preliminarmente uniti fino a formare un'unica polilinea corrispondente all'arco del grafo. Successivamente sono stati individuati i nodi delle polilinee ed estratte le relative coordinate. In tal modo è stato possibile individuare l'angolo formato da due segmenti consecutivi di polilinea.

Sono stati filtrati valori di angoli considerati ininfluenti sul comportamento del guidato e si è poi rapportato il tutto alla lunghezza dell'arco.

La scelta dei parametri da utilizzare nella funzione di costo è stata, in prima istanza, agevolata dal confronto con le formulazioni presenti in letteratura, che permettono una descrizione più dettagliata del contributo al tempo di percorrenza dei vari elementi e delle varie caratteristiche del tracciato. A tal fine sono state considerate in particolare le formulazioni del ritardo alle intersezioni e le relazioni fra le caratteristiche geometriche e contestuali e velocità ricavate in contesti italiani.

A completamento dello studio sono state effettuati dei rilievi sperimentali che hanno prodotto un insieme di dati impiegati per la calibrazione delle curve relative ad alcuni archi campione. Nei paragrafi che seguono sono descritte in dettaglio le fasi dell'analisi.



## **5.2 Metodologie di rilevazione e calibrazione dei parametri delle funzioni di costo**

La fase di calibrazione delle funzioni di costo assume particolare rilevanza nel caso della viabilità secondaria, maggiormente soggetta all'influenza del contesto territoriale e caratterizzata da maggior eterogeneità rispetto alla viabilità principale.

Pertanto sono stati effettuati dei rilievi per fornire delle indicazioni per la valutazione prestazionale, con riferimento alla classificazione descritta nel precedente paragrafo.

Fra le diverse metodologie disponibili per l'effettuazione dei rilievi si possono distinguere due principali tipologie: rilievi "puntuali" ossia su sezione (trasversale) e rilievi su tratta.

Il primo caso presenta il vantaggio della facilità e, a volte, disponibilità immediata del dato, mentre nel secondo caso, pur essendo più oneroso, l'informazione ottenuta risulta maggiormente completa e corretta, in quanto rappresentativa della velocità media nello spazio relativa ad un intero arco.

### **5.2.1 Calibrazioni effettuate a partire da rilievi su tratta**

L'indagine ha riguardato segmenti di rete appartenenti alla "categoria A" caratterizzati da flussi medio/alti e dalla presenza lungo la loro estensione di condizioni insediative non necessariamente omogenee.

Le rilevazioni sono state effettuate registrando mediante riprese video il passaggio dei singoli veicoli in corrispondenza di 3 (in taluni casi 4) sezioni successive opportunamente scelte lungo il segmento. È stato così possibile registrare per ogni veicolo i passaggi in corrispondenza delle sezioni di rilievo al fine di disporre delle informazioni necessarie per la stima dei tempi di percorrenza sul segmento.

L'identificazione dei veicoli è stata resa possibile grazie all'utilizzo di un software per l'acquisizione delle targhe veicolari appositamente realizzato.

Contestualmente per ciascuna sezione è stato effettuato un conteggio classificato dei veicoli transitanti in entrambe le direzioni. I valori di flusso, da associare agli intervalli di aggregazione, sono stati ottenuti come la media aritmetica dei flussi registrati

corrispondentemente alle due sezioni d'estremità (sfalsando l'inizio dell'intervallo nella sezione finale di un valore di tempo pari al tempo medio di percorrenza del tratto analizzato).

Tale metodologia presenta numerosi vantaggi:

- estrazione in maniera simultanea e continua della maggior quantità di informazioni possibile;
- dominio spaziale di analisi (rilievo su tratta estesa);
- nessun intralcio alla circolazione (si opera in modo non intrusivo);
- percentuali di errore sulle stime dei tempi di percorrenza e sui volumi di traffico molto contenute.

Lo scopo della rilevazione, che ha guidato la scelta dei siti, è stato quello di ottenere dati utili alla calibrazione di funzioni di costo da associare non solo alle porzioni di rete direttamente analizzate, ma anche a tratte stradali da considerare ad esse affini.

I segmenti scelti (ovvero le tratte comprese tra le sezioni di detti segmenti) non corrispondono quindi necessariamente ad archi del grafo, quanto piuttosto a tratti caratterizzati da una certa omogeneità nella caratteristiche sia del tracciato che del contesto urbanistico in cui esso è inserito: in questo modo sarà possibile evidenziare l'influenza sul deflusso di diverse variabili.

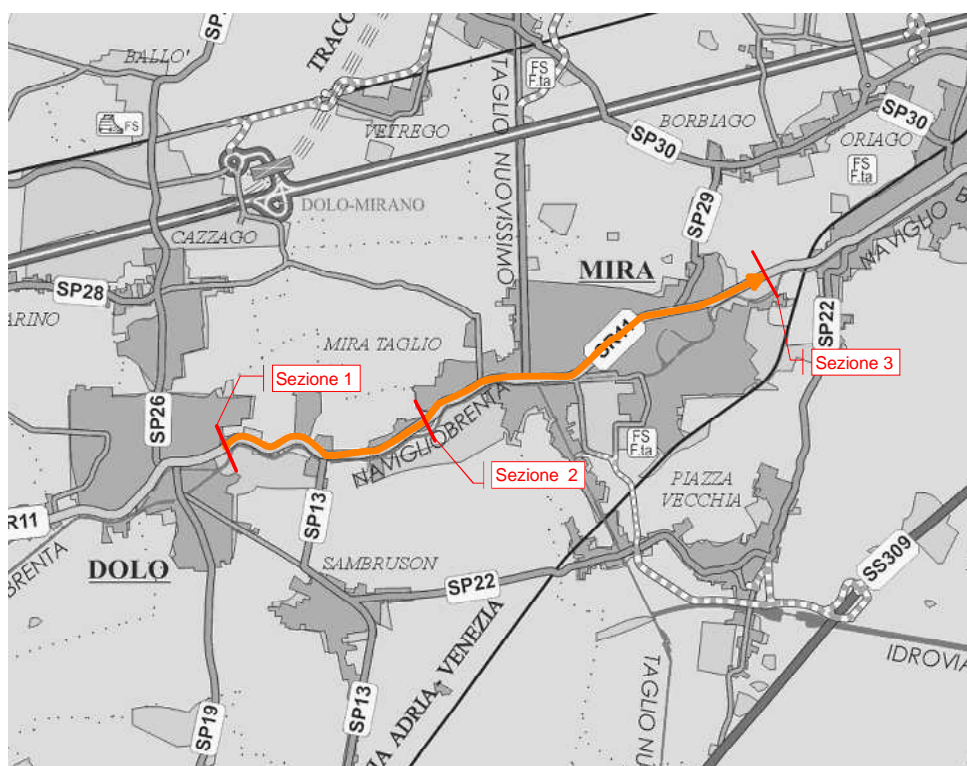
Le sezioni poste lato strada, sono state preferibilmente posizionate in corrispondenza di discontinuità delle caratteristiche insediative, ossia all'inizio e alla fine di zone abitate.

Sono state eseguite con tale modalità quattro rilevazioni, caratterizzate da una durata compresa tra le 2÷3 ore ed effettuate nelle ore diurne ed in condizioni atmosferiche ottimali.

**Tabella 5.1- Elementi caratterizzanti le rilevazioni effettuate per la calibrazione delle funzioni di costo.**

<b>Strada</b>	<b>Tratta</b>	<b>Lunghezza [km]</b>	<b>Data</b>	<b>Ora inizio</b>	<b>Ora fine</b>	<b>n°sezioni</b>
S.R. 11	Dolo – Mira	8	24/05/2005	7.00	10.00	3
S.R. 11	Ponte di Brenta- Dolo	6	24/05/2005	17.00	19.30	3
S.P. 32	S. Maria di Sala - Mestre	12	26/05/2005	7.00	10.00	4
S.R. 515	Noale - Scorzè	6	26/05/2005	17.00	19.30	4

Nelle figure seguenti vengono riportati i segmenti considerati in due di tali rilevazioni, mentre alcune istantanee delle sezioni di rilievo sono mostrate in Figura 5-2.



**Figura 5-1 - Rilevazione 1 – “S.R.11”. Ubicazione delle sezioni e direzione analizzata.**

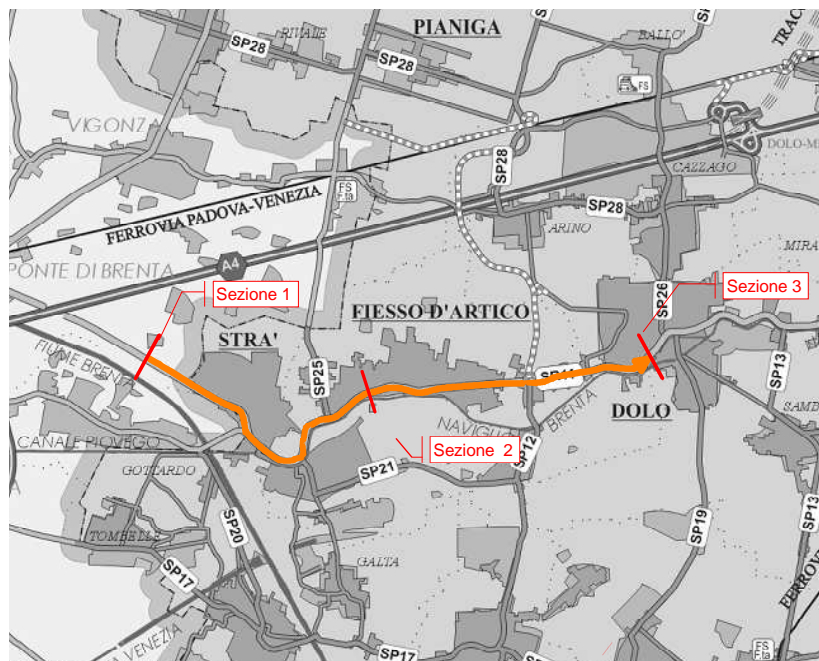


Sezione 1.

Sezione 2.

Sezione 3.

**Figura 5-2 – Rilevazione 1 – “S.R. 11”. Vista delle sezioni.**



**Figura 5-3 - Rilevazione 2 – “S.R.11”. Ubicazione delle sezioni e direzione analizzata.**

Tali rilievi hanno comportato diverse difficoltà operative ed esigenze interpretative. Le difficoltà operative sono connesse soprattutto a difficoltà di lettura della targa in condizioni difficili di ripresa (ad esempio legate a condizioni di illuminazione eccessiva) e a fenomeni di congestione che, causando accodamenti in corrispondenza della sezione, ne rendono difficoltosa la codifica a causa delle frequenti “coperture”; tali problematiche sono accentuate dal fatto che le difficoltà riscontrate in una singola sezione possono vanificare la codifica di quelle adiacenti.

Le esigenze interpretative sono connesse al fatto che la rilevazione dei passaggi alle sezione estreme pone il problema di capire a che elementi della tratta siano legati ed in che proporzione i tempi di percorrenza.

In particolar modo per quanto concerne la tratta compresa fra le sezioni 2-3 della rilevazione 1 si è notato, in corrispondenza della fase di punta, un aumento del valore del tempo di percorrenza, che risulta in tale fase scarsamente correlato all’andamento dei flussi registrati in corrispondenza delle sezioni di estremità (Figura 5-4 e Figura 5-5). Tale andamento è imputabile all’effetto della mobilità locale (immisioni laterali), che pertanto risulta avere ricadute non trascurabili anche in archi di interesse nella

schematizzazione a livello regionale. Tale ipotesi è stata confermata da una successiva rilevazione effettuata mediante veicolo test in tale tratto della rete.

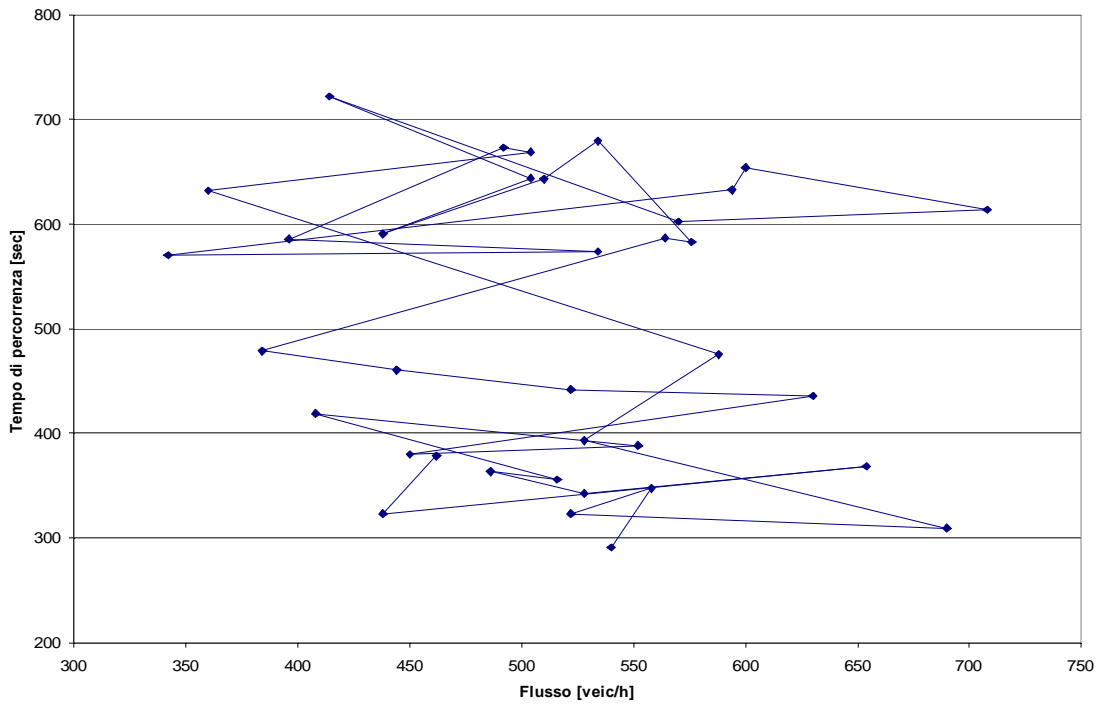


Figura 5-4 – Tratta 2-3: andamento del tempo di percorrenza in funzione del tasso di flusso.

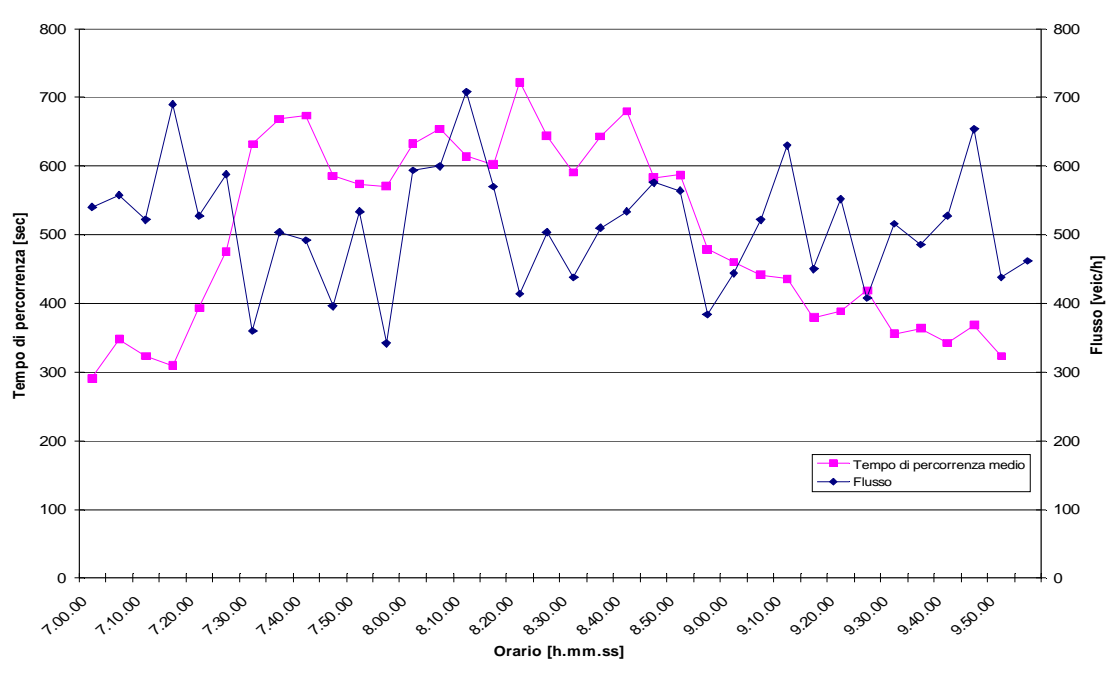


Figura 5-5 – tratta 2-3: tempo di percorrenza e tasso di flusso per successivi intervalli di osservazione.

Il limitato campo di variazione dei volumi di traffico osservati incide negativamente sulla bontà e rilevanza statistica delle calibrazioni ottenute da tali rilievi e quindi sulla possibilità di pervenire a risultati di una certa generalità. Il seguente prospetto presenta le tratte i cui risultati sono stati considerati più significativi ed i relativi valori ottenuti per i parametri di calibrazione:

**Tabella 5.2 - Parametri della funzione BPR calibrati nei contesti analizzati.**

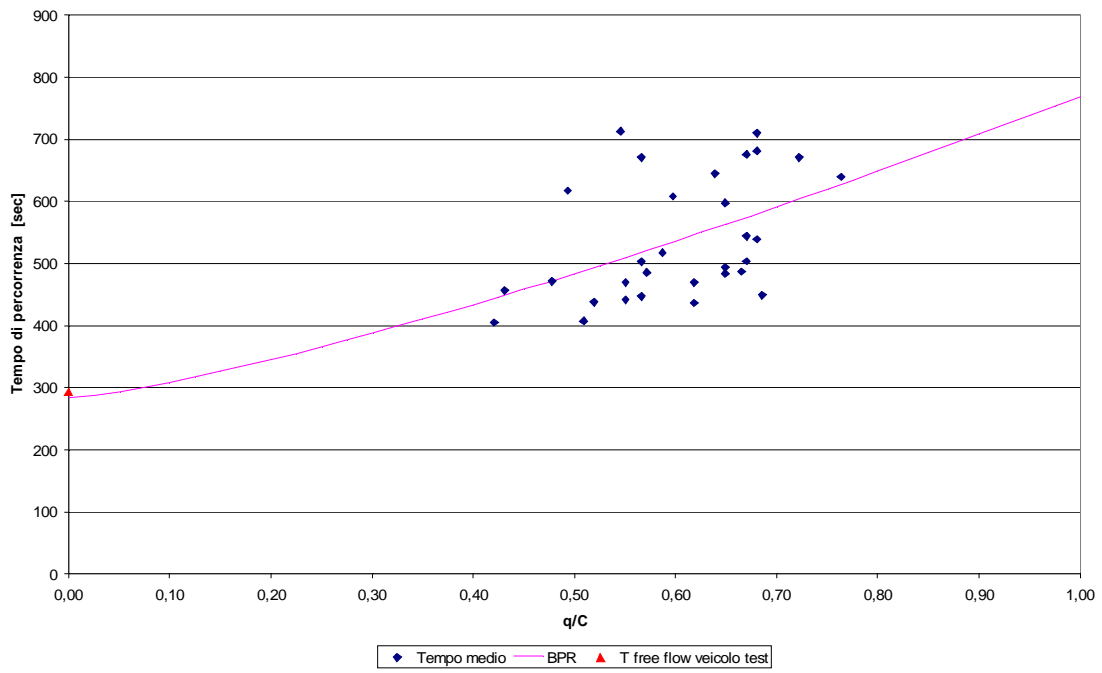
<i>Tratta</i>	<i>Strada</i>	<i>Contesto</i>	<i>N° semafori</i>	<i>% media di verde</i>	$\alpha$	$\beta$
Dolo-Mira	SR11	Extraurbano	0	-	0,181	-
Mira	SR11	Urbano	3	54	0,507 <sup>1</sup>	-
Strà-Dolo	SR11	Urbano	3	50	1,718	1,279
Fiesso-Dolo	SR11	Periurbano	0	-	0,808	-

La stima del parametro  $\beta$ , coi dati disponibili, è in particolar modo difficoltosa; per quanto concerne il parametro  $\alpha$ , sono stati stimati i valori più alti in corrispondenza dell'attraversamento dei centri abitati (con conseguente incremento dei perditempi).

Si riportano in Figura 5-6 i punti sperimentali e la funzione calibrata, nel caso del tratto 4-5 della seconda rilevazione. Si noti, a tal proposito, che un ulteriore punto sperimentale, in aggiunta a quelli ricavati col metodo delle targhe, è stato ottenuto mediante veicolo sonda in condizioni di deflusso libero.

---

<sup>1</sup> Valore ottenuto calibrando i valori nella fascia di morbida caratterizzati da un maggior  $R^2$ . Considerando anche i punti sperimentali dell'ora di punta, caratterizzati da notevole dispersione, si ottiene un valore maggiore di  $\alpha$ .



**Figura 5-6 - tratta 4-5. Tempo di percorrenza in funzione del grado di saturazione e rappresentazione del modello calibrato.**

### **5.2.2 Calibrazioni effettuate a partire da rilievi puntuali su sezione**

Per integrare i dati ottenuti mediante rilievi su tratta è stata effettuata una serie di rilievi puntuali (in totale 18) mediante sia installazioni fisse che mobili, messe a disposizione nel caso del presente studio dalla Provincia di Venezia.

I valori di velocità media e flusso rilevati sono relativi ad intervalli temporali della durata di 5 minuti; si rimanda ai prossimi sviluppi della ricerca per un'individuazione degli intervalli di aggregazione mediante una procedura basata sull'analisi del processo stocastico degli intertempi o dei conteggi.

Nelle elaborazioni si è fatto riferimento all'approssimazione della velocità media nello spazio costituita dalla media armonica delle velocità rilevate (ipotesi di stazionarietà del deflusso considerata accettabile) puntualmente nella sezione in cui sono presenti le spire. Essendo l'analisi finalizzata alla calibrazione di funzioni di costo, i valori di velocità sono stati poi convertiti nei valori corrispondenti di tempo di percorrenza, con riferimento ad una tratta di lunghezza pari a 1,0 km.

Per quanto riguarda il coefficiente di equivalenza per i mezzi pesanti, l'utilizzo dei valori suggeriti dalla letteratura e dall'esperienza è stato affiancato a qualche verifica sperimentale; tali verifiche sono state basate sull'analisi di regressione lineare al fine di valutare l'influenza delle diverse tipologie di veicolo sulla velocità media o sulla valutazione degli intertempi.

I valori di velocità a flusso nullo sono stati ricavati dalla media dei valori ottenuti, sempre distinguendo le due categorie veicolari, per i veicoli liberi ed i veicoli isolati.

Per veicoli "liberi" si intendono i veicoli che presentano un congruo distanziamento rispetto al mezzo che li precede, mentre si dicono "isolati" i veicoli che presentano un congruo distanziamento rispetto sia al mezzo che li precede, sia a quello che li segue.

I veicoli appartenenti a dette tipologie sono caratterizzati dal fatto di procedere, presumibilmente, alla propria velocità desiderata; tuttavia nel primo caso si rileva generalmente una frequenza non trascurabile di veicoli lenti mentre nel secondo una frequenza consistente di veicoli con velocità elevata rispetto all'insieme dei veicoli appartenenti alla corrente.



Sulla base di queste considerazioni il valore più probabile della velocità libera dovrebbe essere intermedio fra quello risultante da questi due campioni.

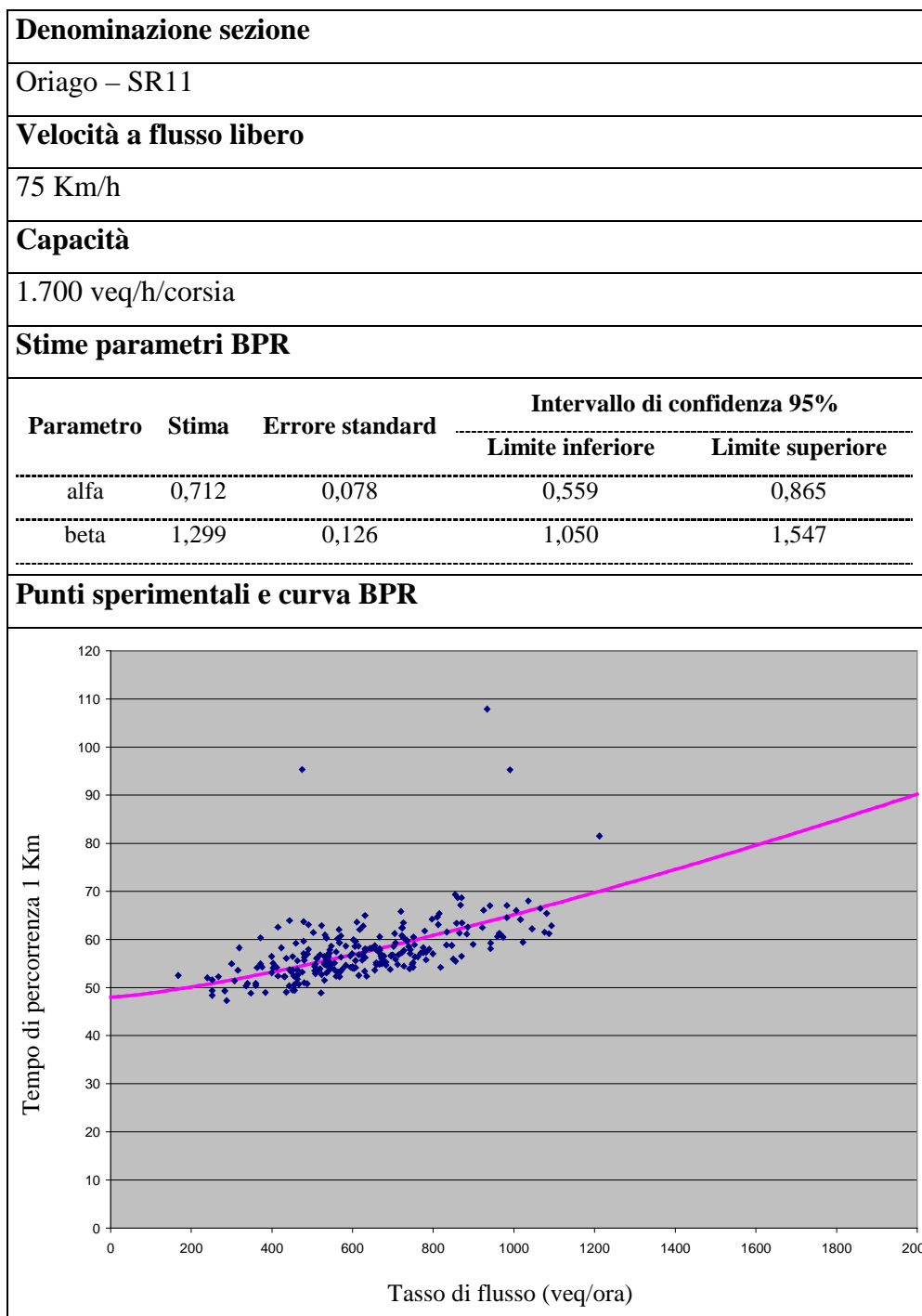
Sulla base dei dati così ottenuti è stata effettuata la calibrazione della funzione BPR; in Tabella 5.3 sono riportati alcuni dei risultati maggiormente significativi fra quelli ottenuti.

Postazione	Contesto	Tipologia strada	V <sub>0</sub> [km/h]	Capacità [autoveic/h/corsia]	ALFA	BETA	R <sup>2</sup>
Ponte della Libertà SR11	periurbano	CLASSE A	90	1.800	0,35	1,046	0,306
S. Anna di Chioggia SS 309	periurbano	CLASSE A	88	1.700	0,45	1,44	0,48
Oriago SR11	periurbano	CLASSE A	75	1.700	0,712	1,299	0,306
Stigliano SR515	periurbano	CLASSE A	70	1.600	0,241	0,743	0,129
Treze SP43	extraurbano	CLASSE A	88	1.600	0,28	0,93	0,24
Bibione SP74	extraurbano	CLASSE A	87	1.600	0,25	0,85	0,33
Olmo di Martellago SP38	periurbano	CLASSE B	65	1.400	0,25	1,13	0,33
Fossò SP12	periurbano	CLASSE B	65	1.500	0,46	1,40	0,17

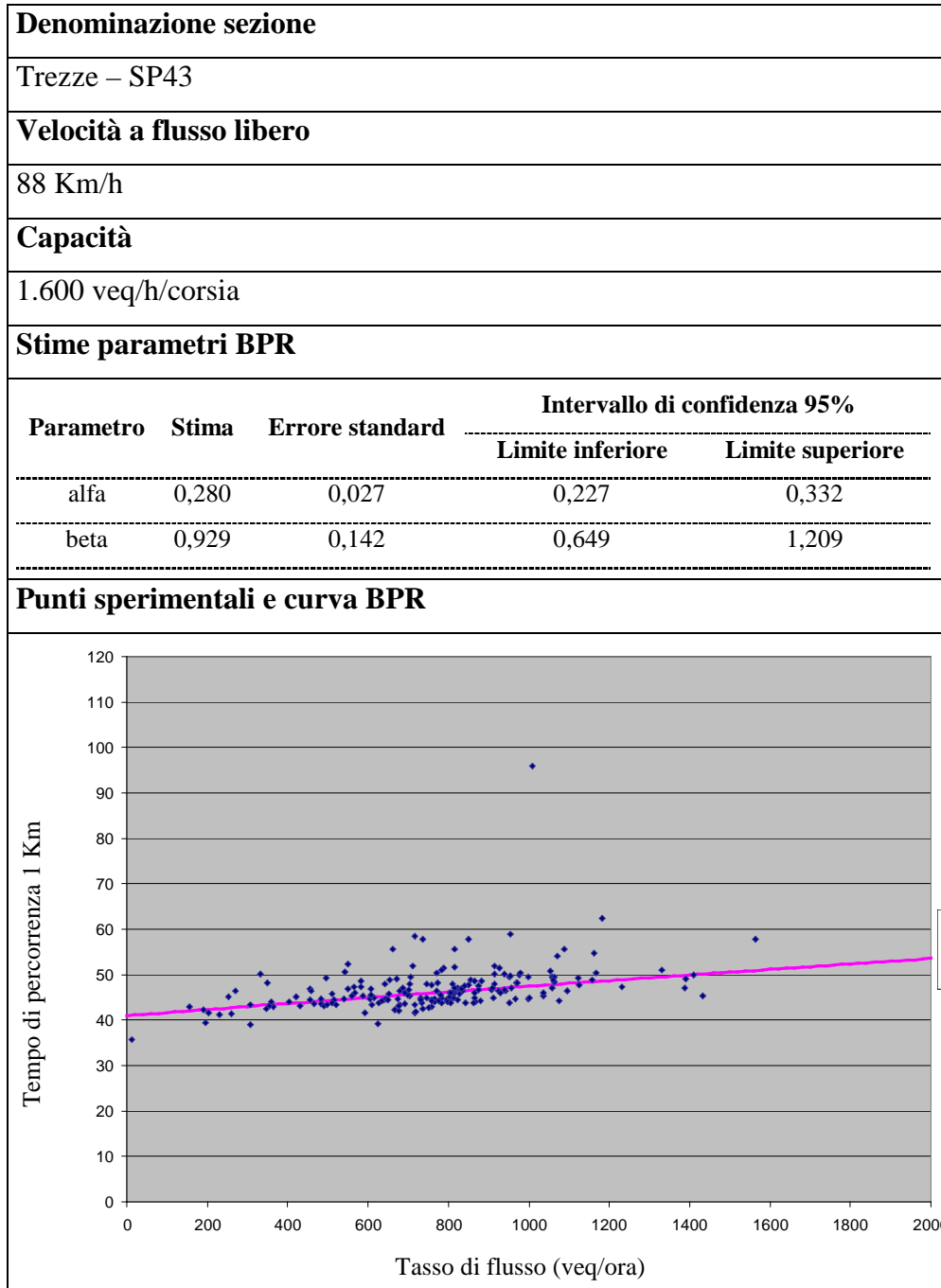
**Tabella 5.3 Alcuni risultati delle calibrazioni della BPR effettuate mediante rilievi puntuali.**

Anche in questo caso si sono avute particolari difficoltà nella calibrazione del parametro  $\beta$ . I valori bassi di tale parametro sono ascrivibili presumibilmente ai valori di flusso presenti nei campioni esaminati. Inoltre il peculiare andamento (precoce manifestarsi del condizionamento) della curva-velocità flusso nel caso delle strade bidirezionali a due corsie, riportato in letteratura e in molti caso confermato dai dati esaminati, concorre a determinare valori di  $\beta$  inferiori ad 1. Si ricorda, tuttavia, che in vista dell'utilizzo in fase di assegnazione, sono richiesti valori maggiori di 1 di tale parametro (in modo da avere congrui incrementi del ritardo in condizione di sovrasaturazione e facilitare il processo di ridistribuzione dei flussi durante il processo iterativo di assegnazione).

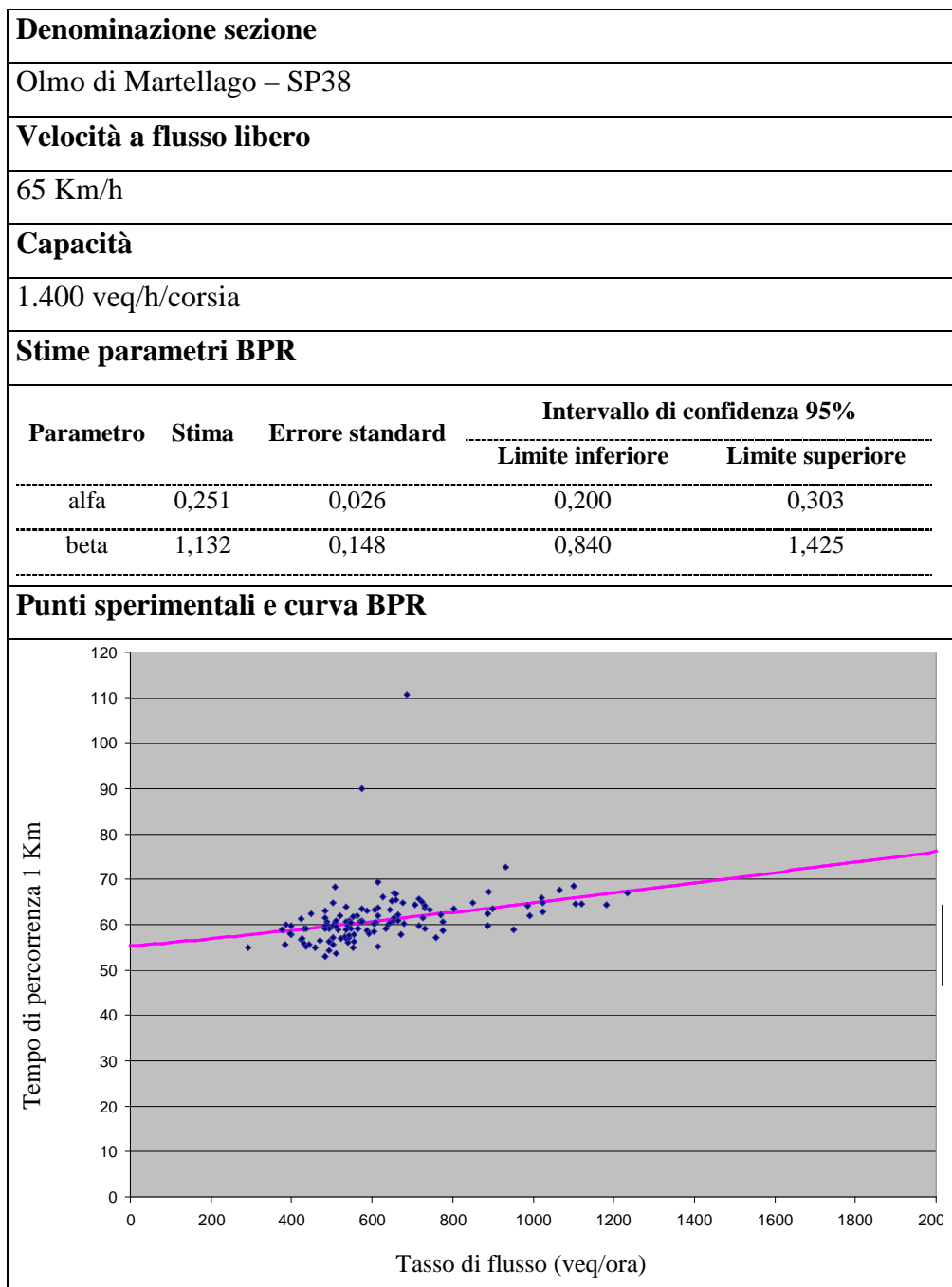
Le schede successive riportano i dati relativi ad un esempio per ognuna delle tre tipologie maggiormente indagate.



**Figura 5-7 – Risultato della calibrazione della funzione BPR nel caso dei dati di una sezione di una strada di “classe A” in contesto periurbano.**



**Figura 5-8 – Risultato della calibrazione della funzione BPR nel caso dei dati di una sezione di una strada di “classe A” in contesto extraurbano.**



**Figura 5-9 - Risultato della calibrazione della funzione BPR nel caso dei dati di una sezione di una strada di “classe B” in contesto periurbano.**

È stata inoltre valutata l'influenza specifica delle diverse categorie di veicoli e del flusso nella direzione opposta. Con riferimento al caso della sezione sull'SR11 in località Oriago, si riporta il risultato della regressione lineare della velocità sulle seguenti variabili esplicative:

- flusso di veicoli leggeri nella direzione considerata;
- flusso di veicoli pesanti nella direzione considerata;
- flusso di veicoli leggeri nella direzione opposta;
- flusso di veicoli pesanti nella direzione opposta;

In Tabella 5.4 sono riportati i risultati della calibrazione (che ha comportato un valore di  $r^2$  corretto pari a 0,302) ed in particolare i coefficienti, indicati con B nella seguente tabella, delle singole grandezze esplicative.

Si noti come sia diverso il peso dei veicoli nella direzione considerata rispetto a quello dei veicoli della direzione opposta (che tuttavia non sono irrilevanti)

**Tabella 5.4**

	<b>Coefficienti non standardizzati</b>		<b>Coefficienti standardizzati</b>	<b>t</b>	<b>Sig.</b>
	<b>B</b>	<b>Errore std.</b>	<b>Beta</b>		
(Costante)	76,914	1,616		47,601	,000
Flusso_leggeri_dir1	-,015	,003	-,429	-5,617	,000
Flusso_leggeri_dir2	-,004	,002	-,175	-2,118	,036
Flusso_pesanti_dir1	-,034	,015	-,179	-2,353	,020
Flusso_pesanti_dir2	-,022	,010	-,178	-2,145	,034

Dal rapporto fra il coefficiente dei veicoli pesanti e quello dei veicoli leggeri si può ottenere una stima del PCE [26], che nel caso specifico risulta pari a 2,26; tale valore trova riscontro in quelli proposti in letteratura e ricavati dall'esperienza.

Un'ulteriore stima del PCE, condotta sulla base degli intertempi ha condotto a risultati sostanzialmente uguali.

Il differente effetto dei flussi delle due direzioni trova conferma nel tentativo di calibrazione della BPR considerando la somma dei flussi nelle due direzioni (cfr. §1.2.1.3). In tal caso la regressione è stata caratterizzata da parametri statistici meno soddisfacenti (con  $R^2$  pari a 0,231) di quanto ottenuto calibrando la funzione col solo flusso nella direzione considerata. I valori calibrati,  $\alpha = 0,569$  e  $\beta = 1,206$ , sono risultati

comunque significativi e non molto dissimili da quanto ottenuto secondo la procedura descritta precedentemente.

Un elemento particolarmente problematico nel caso dei rilievi su sezione è costituito dalla questione della rappresentatività del dato così ottenuto nel momento in cui lo si riferisca ad un intero arco. Tale problematica ha un aspetto teorico sempre presente allorché si utilizzino dati rilevati su sezione, legato alla differenza insita fra velocità media nello spazio e velocità media nel tempo.

Legato invece al contesto specifico è la constatazione delle differenze presenti nei vari punti appartenenti ad uno stesso arco.

Constate le difficoltà insite nell'utilizzo dei diversi metodi si ritiene pertanto auspicabile l'utilizzo di un approccio integrato.

Volendo evitare le difficoltà operative del metodo delle targhe, elementi utili nell'estensione alla tratta dei risultati su sezione possono essere forniti dal raffronto con i metodi e valori proposti dall'HCM, in particolare nel cercare di soppesare il contributo dei vari elementi presenti nell'arco al fine del computo del perditempo totale. Indicazioni interessanti in tal senso possono essere ricavate anche mediante l'utilizzo del metodo del veicolo sonda. Infatti si è constatato che integrando una rilevazione di tal tipo con i dati di diverse postazioni fisse (facenti uso di diverse tecnologie), si conseguono risultati incoraggianti nel tentativo di ricostruire il peso specifico di diversi elementi, difficilmente discernibile nel rilievo su tratta (possibile causa di bassi valori di  $R^2$ ), e di vagliare il livello di rappresentatività sulla tratta dei risultati dei sensori puntuali.

Tale tecnica oggi si può avvalere delle funzionalità fornite dai ricevitori GPS e dalle possibilità garantite dagli algoritmi di map-matching per l'attribuzione dei percorsi rilevati agli elementi della rete. Si osserva come quest'ultima metodologia risulti particolarmente vantaggiosa nel caso di valori elevati di flusso o in condizioni di congestione, in cui si può ritenere che il tempo di percorrenza del veicolo test sia veramente rappresentativo di quello di tutti i mezzi della corrente veicolare.

## CONCLUSIONI

Nel corso del presente lavoro di tesi è stata presentata un'analisi delle problematiche inerenti alla schematizzazione dell'offerta di trasporto alla scala regionale (in particolare ci si riferisce all'ambito territoriale di interesse per la Provincia di Venezia), evidenziando i vantaggi derivanti da un utilizzo congiunto di modelli di simulazione e sistemi informativi. In particolar modo l'attenzione è stata focalizzata su alcuni aspetti che, in base all'esperienza maturata nel contesto specifico di studio, sono risultati di particolare problematicità ed interesse: la valutazione prestazionale degli archi del grafo del trasporto privato mediante funzioni di costo, l'integrazione e l'utilizzo di diverse fonti informative (dati forniti dalle aziende di trasporto pubblico e presenti nella banca dati Multinet) assieme ad una strutturazione della banca dati idonea all'elaborazione di indicatori di prestazione in merito all'esercizio del sistema di trasporto pubblico.

La prima parte del presente documento è dedicata alla descrizione dei modelli per la schematizzazione dell'offerta di trasporto privato, approfondendo l'analisi mediante una rassegna delle diverse forme funzionali relativamente alle funzioni di costo presenti in letteratura.

Nel secondo capitolo viene presentata una panoramica sulle molteplici e notevoli possibilità offerte dai sistemi informativi geografici nella gestione e condivisione delle informazioni relative ad un sistema complesso (quale quello oggetto di studio).

Nel successivo capitolo viene proposta una descrizione delle cosiddette reti gerarchiche commerciali (in particolare la banca dati Multinet di Tele Atlas), largamente disponibili e aggiornate sistematicamente, facendo riferimento agli standard internazionali di riferimento per tali banche dati.

La terza parte del lavoro ha riguardato invece l'implementazione di un sistema informativo con riferimento all'ambito territoriale specifico; contestualmente viene proposta una metodologia che usufruisce delle funzionalità di tale sistema informativo per rendere più efficiente il processo di calibrazione di funzioni di costo d'arco.

Le attività svolte hanno prodotto i risultati descritti nel seguito consentendo di delineare gli sviluppi futuri della ricerca:

1. progettazione ed implementazione di un sistema informativo a supporto della pianificazione e del monitoraggio del sistema dei trasporti delle persone,

relativamente all'ambito territoriale di interesse provinciale. L'architettura del sistema informativo ha permesso di integrare la rete geografica commerciale Multinet di Tele Atlas, instaurando la corrispondenza con la schematizzazione della rete realizzata ai fini dell'analisi trasportistica. Tale operazione consente di attingere al ricco contenuto informativo della rete commerciale. La gestione centralizzata e la struttura "aperta" del sistema consentiranno, come sviluppo futuro, una crescente integrazione di nuove fonti di dati e procedure.

2. Elaborazione di una metodologia di classificazione funzionale degli archi della rete sulla base delle informazioni provenienti dalla banca dati Multinet. Va osservato come la classificazione sia stata effettuata su un numero limitato di informazioni. L'integrazione con altre fonti dati (come il Catasto Stradale), nel caso del presente studio non disponibili, e/o un arricchimento del contenuto informativo nelle prossime versioni della banca dati potranno portare ad un notevole miglioramento dell'efficacia del metodo.
3. Calibrazione di funzioni di costo, segnatamente del tipo "BPR", per alcuni archi campione delle classi di archi definite. Allo scopo sono stati realizzati diversi rilievi sia su sezione che su tratta: la metodologia di rilievo su sezione, pur consentendo un facile approvvigionamento dei dati, pone il problema della rappresentatività del dato rilevato su sezione, allorché lo si riferisca ad un intero arco della rete. Per ovviare a tali inconvenienti si è quindi proceduto alla realizzazione di rilievi su tratta; tuttavia tali rilievi hanno comportato diverse difficoltà operative ed interpretative. Pertanto, date le problematiche insite dei vari metodi, si ritiene auspicabile l'utilizzo di un approccio integrato, includendo il metodo del veicolo sonda, che, oggi, si può avvalere delle possibilità offerte dalla tecnologia GPS. Sviluppi futuri della ricerca potranno consentire di espandere il campione di calibrazione ed estendere l'analisi ad altre forme funzionali. Ulteriori spunti di approfondimento riguardano l'analisi delle condizioni di stazionarietà, relativamente agli intervalli temporali di riferimento e l'influenza di diverse tipologie di veicoli e dei flussi in archi diversi da quello considerato (funzioni non separabili) sulle modalità del deflusso. In tal senso risulterà



particolarmente efficace l'impiego delle funzionalità del sistema informativo proposto nel porre in relazione i diversi elementi di interesse.

## BIBLIOGRAFIA PARTE I

- [1] Akçelik, R. (1991). *Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function*. Australian Road Research 21 (3), pp. 49–59. Pubblicato rivisto e corretto nel 2000, <http://www.aattraffic.com/>.
- [2] Akçelik, R.(2002). *Speed-Flow Models for Uninterrupted Traffic Facilities*, Akçelik & Associates Pty Ltd <http://www.aattraffic.com/>.
- [3] Akçelik, R.(2003). *Speed-Flow and Bunching Relationships for Uninterrupted Flows*, presentato alla 25<sup>th</sup> Conference of Australian Institute of Transport Research (CAITR 2003), University of South Australia, Adelaide, Australia. Akçelik & Associates Pty Ltd, <http://www.aattraffic.com/>.
- [4] Amodeo, Camus R., D'Asdia P., Manzoni G., Marchionna A., Crisman B. et al. (1997) Modalità di istituzione ed aggiornamento del Catasto delle Strade, CNR Commissione di Studio, gennaio 1997.
- [5] Binetti M. G., Ciani E., *Effects of traffic analysis zones design on transportation model* .
- [6] Bovy P.H.L. – Jansen G.R.M. (1983). *Network aggregation effects upon equilibrium assignment outcomes: an empirical investigation* , Transportation Science, 17, pp 240-262.
- [7] Boyce, D.E., Janson, B.N. and Eash, R.W. (1981). *The Effect on Equilibrium Trip Assignment of Different Link Congestion Functions*, Transportation Research, 15A, pp. 223-232.
- [8] Branston D. (1976). *Link Capacity Functions: A Review*, Transportation Research, Vol. 10 pp. 223-236.
- [9] Bureau of Public Roads (1964). *Traffic Assignment Manual*, U.S. Department of Commerce, Washington DC.
- [10] Camus R., Tassan Zanin R. (2002), *Modelli di dati per i servizi di Trasporto Pubblico* in Francesco Russo, *Modelli e metodi per la programmazione dei servizi di trasporto pubblico locale: uno stato dell'arte* (2002) vol. 1797.19 ed.Franco Angeli.
- [11] Cappelli A. , Petruccelli (1995). La simulazione dei nodi secondari nel grafo della rete stradale urbana. Trasporti e Trazione n° 3 Pp. 106-117.
- [12] Carteni A., Punzo V.(2007). *Travel time cost functions for urban roads: a case study in Italy* in *Urban Transport XIII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*, Transactions of the Wessex Institute.

- [13] Cascetta E. - Nuzzolo A. (1978). *I modelli stocastici dei flussi veicolari su strade senza possibilità di sorpasso*. *Autostrade*, 7/8 1978.
- [14] Cascetta E. (1998). *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*, Utet.
- [15] Cascetta E. (2006). *Modelli per sistemi di trasporto – teoria ed applicazioni*, Utet.
- [16] C.N.R. (1983). *Istruzioni per la determinazione della redditività degli investimenti stradali*. *Bollettino Ufficiale (Norme Tecniche)*, 17, n.91.
- [17] Crisman B., Fugaro L., Marchionna A., Roberti R. (2003). *Modello di previsione delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale*, XII Convegno Nazionale S.I.I.V, Padova 30/31 ottobre 2003.
- [18] Davidson, K.B. (1966). *A Flow Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning*, *Proceedings Australian Road Research Board* 3, pp.183-194.
- [19] Davidson, K.B. (1978). *The theoretical basis of a flow-travel time relationship for use in transportation planning*, *Australian Road Research*, 8(1), pp.32-35; discussione pg.45.
- [20] Davis G. A. – Xiong H. (2007). *Access to Destinations: Travel Time Estimation on Arterials*. Dept. of Civil Engineering - University of Minnesota.
- [21] Dell'Acqua M., Esposito M., Lamberti R., Simonetti D., Coraggio G. (2006). *Misure di velocità e analisi sperimentali su strade extraurbane a due corsie*. XVI Convegno Nazionale S.I.I.V.
- [22] De Luca M.(2003). *Velocità attuate dai guidatori in ambito autostradale. indagine sperimentale condotta su un tronco di autostrada A3*, XIII Convegno Nazionale S.I.I.V, Padova 30/31 ottobre 2003.
- [23] De Luca M., Grossi R., Garofalo C. (2002). *Indagine sperimentale sulle velocità attuate dai guidatori. un modello comportamentale per la costruzione del diagramma di velocità*, XII Convegno Nazionale S.I.I.V, ottobre 2002.
- [24] Doherty, A.R. (1977). *A comprehensive junction delay formula*, LTR 1 Working Paper, Department of Transport.
- [25] Dowling R.G., Singh R., Cheng W.W.K. (1998). *The accuracy and performance of improved speed-flow curves*. *Technical Note. Road and Transport Research* 7(2), pp. 36-51.

- [26] Elefteriadou L., Torbic D., Webster N. (1997). Development of Passenger Car Equivalents for Freeways, Two-Lane Highways, and Arterials, Transportation Research Record 1572 pp.51-58.
- [27] ESRI (1998). *ESRI Shapefile Technical Description* - July 1998.
- [28] Ferrari, P., Treglia, P., Cascetta, E., Nuzzolo, A., Olivotto, P.( 1982). *A new method for measuring the quality of circulation on motorways*, Transportation Research Vol. 16, No. 5 pp. 399-418.
- [29] Ferrari P. (2001). *Fondamenti di Pianificazione dei Trasporti*, Pitagora Editrice.
- [30] Festa D. C. - Nuzzolo A. (1990). *Analisi sperimentale delle relazioni velocità-flusso per le strade urbane*. Le Strade n.1226, pp.459-464.
- [31] Filippini S. (2000). *Le funzioni di costo:evoluzione storica, recenti sviluppi di ricerca e implicazioni sul processo di assegnazione*. Trasporti e Trazione, n° 6/ 2000 pp.215-226.
- [32] Filippini S. – Lupi M. (2005) *Funzioni di costo con jacobiano asimmetrico ed equilibrio nelle reti di trasporto stradale urbano in Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti. Seminario 2002*, ed. F. Angeli.
- [33] Gallo M. (1983). *La rete dei trasporti regionali. Metodologie di indagine di verifica delle ipotesi progettuali*. in *Dalla strada alla città* di P.P. Sandonni, M. Gallo, N. Ventura, R. Vescovi, ed. F. Angeli.
- [34] Hall F. L. (1996). *Traffic Stream Characteristics in Traffic Flow Theory: a state-of-the-art report* a cura di Gartner N. – Carroll J.M. – Ajay K.R., TRB.
- [35] HCM (1965). *Special Report 87: Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.
- [36] HCM (1985). *Special Report 209: Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.
- [37] HCM (1994). *Special Report 209 3rd edition, Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, National Research Council,. Washington DC.
- [38] HCM (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- [39] Hurdle V. F. (1984). *Signalized intersection delay model – A primer for uninitiated* , Transportation Research Record, 971, pp. 96-105. Transportation Research Board.
- [40] Ignaccolo, M., Giunta, U. (1998). *Determinazione della curva di deflusso per strade di scorrimento in ambito urbano: rilievi e considerazioni sulla*

Circonvallazione di Catania, I piani urbani del traffico, in De Luca M., Astarita V. , Franco Angeli, 1998.

- [41] Jansen G.R.M., Bovy P.H.L. (1982). *The effect of zone size and network detail on all-or-nothing and equilibrium assignment outcomes* Traffic Engineering and Control 23(6), pp. 311-317.
- [42] Jinsoo You, Nedovic-Budic Z., Tschangho J.K. (1996). *A GIS-Based Traffic Analysis Zone Design: Technique*. Transportation Planning and Technology, vol. 21, pp. 45-68.
- [43] Jinsoo You, Nedovic-Budic Z., Tschangho J.K. (1996). *A GIS-Based Traffic Analysis Zone Design: Implementation and Evaluation*. Transportation Planning and Technology, vol. 21, pp. 69-91.
- [44] Lupi M. (1992). *Il vettore dei flussi di equilibrio di una rete di trasporto in relazione all'uso di differenti funzioni di costo in Modelli e metodi per l'analisi ed il controllo delle reti di trasporto* di Cascetta E. - Salerno G. ed F. Angeli, Milano.
- [45] Luttinen R T. *Statistical Analysis of Vehicle Time Headways*. Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Publication 87. Otaniemi, Finlandia 1996. 193 pp.
- [46] Luttinen T. (2001). *Level of service on Finnish Two-Lane Highways: An Overview* TL Research Report 1/2001.
- [47] Luttinen T. (2001). *Traffic Flow on Two-Lane Highways: An Overview* TL Research Report 1/2001.
- [48] Mahdy H. (2002). *A speed-flow model for Austrian motorways*.
- [49] Martin W. (1998). *Travel Estimation Techniques for Urban Planning*. NCHRP Report 365, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [50] Meneguzzer C. (1995). *An equilibrium route choice model with explicit treatment of the effect of intersections*, Transportation Research Vol.29-B n°5 pagg. 329-356.
- [51] Ministero dei Lavori Pubblici - Decreto 1 giugno 2001 - “*Modalità di Istituzione ed aggiornamento del Catasto delle strade ai sensi dell’art. 13, comma 6 del decreto legislativo 30 aprile 1992, n. 285, e successive modificazioni*”.
- [52] Nielsen O. A., Jørgensen H. J., Jørgensen R. M. (2007). *Estimation of speed-flow and flow-density relations on the motorway network of the greater Copenhagen region*. 6<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Aalborg 18-20 June 2007.

- [53] Nuzzolo A. - Russo F. (1993). *Un modello statistico di calcolo delle velocità per le strade extraurbane*. Trasporti e Trazione 4/93.
- [54] Olivari M. (1994). *Elementi di teoria e tecnica della circolazione stradale*. Ed. Franco Angeli, Milano.
- [55] Ortúzar J. D., Willumsen L. G. (2004). *Pianificazione dei sistemi di trasporto*, Hoepli .
- [56] Outram V.E., Thompson E. ,(1978). *Driver route choice-behavioural and motivational studies*. Proceedings 5<sup>th</sup> PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick, luglio 1977.
- [57] Pinna F., Schirru M. (2002). *Le curve di deflusso : influenza dei differenti tipi di utente e della classificazione funzionale dell'arco stradale*. XII Convegno Nazionale S.I.I.V, ottobre 2002.
- [58] Rossi G. (2006). *Equilibrio asimmetrico in una rete di trasporto stradale urbano con rappresentazione dettagliata delle intersezioni semaforizzate, non semaforizzate e a rotatoria*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Bologna.
- [59] Rossi R., Caprini A., Maratini R., Vescovi R., Gastaldi M. (2007). *Progetto e sviluppo di un sistema informativo a supporto delle attività di pianificazione e controllo del sistema trasporto delle persone. La rappresentazione del sottosistema dell'offerta nella Provincia di Venezia*. Urban Promo 2007, IUAV Venezia.
- [60] Sandonnini P. (1994). *Il trasporto nella dinamica dei sistemi territoriali – fondamenti di analisi e pianificazione*, Pubblicazione dell'Istituto di Strade e Trasporti, Università degli Studi di Padova.
- [61] Skabardonis A., Dowling R. (1997). *Improved Speed-Flow Relationships for Planning Applications*. In Transportation Research Record 1572, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1997, pp. 18-23.
- [62] Skabardonis A., Dowling R. (2006). *Urban Arterial Speed-Flow Equations for Travel Demand Models*.
- [63] Singh R. (1999). *Improved speed-flow relationship: application to transport planning models*, presentato alla 7<sup>th</sup> TRB Conference on Application of transportation Planning Methods, Boston, MA, marzo 1999.
- [64] Spiess H. (1990). *Conical Volume-Delay Functions*, Transportation Science, Vol. 24, N° 2, Maggio 1990, pp. 153-158.
- [65] Steenbrink P. (1974) *Optimization of Transport Networks*. John Wiley & Sons.

- [66] Taylor M.A.P. (1977). *Parameter estimation and sensitivity of parameter values in a flow rate/travel time function*. Transportation Science, 11(3), pp.275-292.
- [67] Tisato P. (1991). *Suggestions for an improved Davidson travel time function*. Australian Road Research, 21 (2), pp. 85-100.
- [68] Transportation Research Board (1965). *Special Report 87: Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board.
- [69] Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- [70] Caprini A., Gastaldi M., Migliorini F., Rossi R. e Vescovi R. (2001). “*Osservatorio regionale della mobilità del Veneto: note metodologiche*”, Pubblicazione interna del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell’Università di Padova, Ottobre 2001.
- [71] Wardrop J.G. (1952). *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, Volume I, pp. 325-362. Part II, Vol. 3, pp. 158-171.
- [72] Wooton H.J., Ness M.P., Burton R.S. (1981). *Improved direction signs and the benefits for road users*, Traffic Engineering and Control n° 22, pp.264-268.
- [73] Xie C., Cheu R., Lee D. (2001). *Calibration-Free Arterial Link Speed Estimation Model Using Loop Data*. ASCE J. of Transportation Engineering, Nov/Dec 2001, pp. 507-514.
- [74] Zhao Y., Kockelmann K. (2000). *The propagation of uncertainty through travel demand models*, Southwest Region University Transportation Center, The University of Texas at Austin.
- [75] Zhao F., Ding Z. (2006). *Improving Highway travel time estimation in FSUTMS by considering intersection delays*, The Florida Department of Transportation Research Center.
- [76] Wu N. (2002). *A new approach for modeling of fundamental diagrams*, Transportation Research A 36, p. 867-884.

## BIBLIOGRAFIA PARTE 2

- [77] Atzeni P, Ceri S., Fraternali P., Paraboschi S., Torlone R. (2007) *Basi di dati – Modelli e linguaggi di programmazione*. McGraw-Hill.
- [78] Atzeni P, Ceri S., Fraternali P., Paraboschi S., Torlone R. (2007) *Basi di dati – Architetture e linee di evoluzione*. McGraw-Hill.
- [79] Bosetti S., Maroni D., Rinaldi M. (2003). *I Sistemi Informativi Geografici per i trasporti*, QUADERNO RT N° 6.
- [80] Caldwor R. (2006). *Multi-modal routing with Oracle Network Data Model & Oracle Mapviewer* , Australian Oracle Spatial User Meeting Melbourne, 21 August 2006.
- [81] CEN (1995). *Geographic Data Files – V 3.0 – 12 October 1995*.
- [82] CEN (2001). *The European Reference Data Model for Public Transport - V5.0 - revised ENV 12896 - 11 June 2001*.
- [83] Choi K.- Jang W. (2000). *Development of a transit network from a street map database with spatial analysis and dynamic segmentation*, Transportation Research Part C 8 (2000) 129-146.
- [84] Claramunt C. - Jiang B. - Bargiela A. (2000). *A new framework for the integration, analysis and visualisation of urban traffic data within geographic information systems*, Transportation Research Part C 8 (2000) 167-184.
- [85] Codd E.F. (1970). *A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks*, Communications of the ACM 13 (6): 377–387.
- [86] Corriere Ferdinando (2006). *Il ruolo dei sistemi informativi regionali nell'adeguamento delle infrastrutture di trasporto. Accessibilità ed intermodalità nella Regione Sicilia*. Edizioni Franco Angeli.
- [87] D'Este G.M. – Zito R. – Taylor M.A.P. (1999). *Using GPS to measure traffic system performance*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 14, pp. 255-265.
- [88] Demin Xiong (2000). *A three-stage computational approach to network matching* Transportation Research Part C 8 pg.71-89.
- [89] Dijkstra E. W. (1959), *A note on two programs in connection with graphs*. Numerische Mathematik, 1 (269-271).



- [90] Dueker, K.J - Butler, J.A. (2000) *A geographic information system framework for transportation data sharing*, Transportation Research Part C 8 (2000) 13-36 .
- [91] Elmasri R. - Navathe S. B. (2006). *Fundamentals of Database Systems*, 5th Edition, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. Redwood City, CA, USA.
- [92] ESRI (1998). *Shapefile Technical Description*. An ESRI White Paper, USA.
- [93] ISO (2004). *Intelligent transport systems - Geographic Data Files (GDF) - Overall data specification* - ISO 14825:2004.
- [94] Marchal, F., Hackney, J., Axhausen, K.W., (2005). *Efficient map matching of large global positioning system data sets: Tests on speed monitoring experiment in Zurich*. Transportation Research Record 1935, 93–100.
- [95] Murakami E. – Wagner D.P. (1999). *Can using global positioning system (GPS) improve trip reporting*. Transportation Research Part C, 1-1999, pp149-165.
- [96] Nielsen O.A. (2004). *Behavioural responses to pricing schemes: Description of the Danish AKTA roadpricing experiment in Copenhagen*. In *Triennial Symposium of Intelligent Transportation Systems*. Vol 8(4). Pp233-251. Taylor& Francis.
- [97] Nielsen O.A. – Kristensen J.P. (2005). *Measuring congestion in Copenhagen with GPS*. ITS World Conference. Londra.
- [98] Nielsen O.A. – Würtz C. – Jorgensen R. M. – Munk R. (2007). *Improved map-matching algorithm for GPS-DATA. Methodology and test on data from the AKTA roadpricing experiment in Copenhagen*. European ITS Conference. Paper 2626. Aalborg, Denmark 20/2.
- [99] Nobile M. (2007) *Valutazione del livello di servizio di strade urbane mediante dati di telerilevamento di veicoli di trasporto pubblico* Tesi di dottorato, relatore M. Lupi, Università degli Studi di Bologna.
- [100] Ochieng W.Y., Quddus M.A., Noland R.B. (2004). *Map-matching in complex urban road networks*. Brazilian Journal of Cartography (Revista Brasileira de Cartografia) 55 (2), 1–18.
- [101] Quiroga C. A. – Bullock D. (1998). *Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology*. Transportation Research Part C6, pp 101-127. Pergamon, elsevier.
- [102] Quddus M. A., Ochieng W. Y., Noland R. B. (2006). *Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions*, Transportation Research Part C 15 (2007) pp. 312–328.

- [103] Rigaux P., Scholl M., Voisard A. (2002). *Spatial Databases with application to GIS*. Morgan Kaufmann Publisher, Elsevier Science, San Francisco (USA).
- [104] Snodgrass R.T. (2000). *Developing Time-Oriented Data base Application SQL*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco (CA).
- [105] Sutton J.C. - Wyman M. M. (2000). *Dynamic location: an iconic model to synchronize temporal and spatial transportation data*, Transportation Research Part C 8 (2000) 37-52.
- [106] Taylor M.A.P. - Woolleu J.E.U. – Zito R. (2000). *Integration of the global positioning system and geographical information systems for traffic congestion studies*. Transportation Research Part C 8 pp. 91-108.
- [107] Tele Atlas (2003a). *MultiNet™ User Guide Shapefile Format* - release 1.2., Tele Atlas North America, USA.
- [108] Tele Atlas (2003b). *Shapefile 4.1 Format Specifications Tele Atlas MultiNet™* - release 1.2., Tele Atlas North America, USA.
- [109] You J, Kim T.J. (2000) *Development and evaluation of a hybrid travel time forecasting model*, Transportation Research Part C 8 (2000) 231-256.
- [110] Wuest B. A., Darka M.(2007). *Visualization and modeling of traffic congestion in urban environments*, 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007 Aalborg University, Danimarca.

*Desidero ringraziare le persone che in questi anni mi sono state vicine e hanno in vario modo contribuito al raggiungimento di questo traguardo.*

*Ringrazio Chiara, i miei genitori e le mie sorelle Chiara e Federica per il loro affetto, supporto e aiuto, grazie ai quali ho potuto superare anche i momenti più difficili.*

*Ringrazio il Prof. R. Vescovi e il Prof. R. Rossi per avermi offerto questa possibilità e per la disponibilità dimostratami nello svolgimento del lavoro.*

*Desidero ringraziare l'Ing. A. Caprini, l'Ing. L. Galeotti, l'Ing. F. Ghanat Abadi e il personale della ditta Neotecnica Srl per il supporto, la fiducia e l'aiuto fornitomi.*

*Ringrazio l'Ing. M. Gastaldi e l'Ing. A. Leon per la disponibilità, lo stimolante scambio di idee e per il materiale fornitomi.*