Documento stampato da PDF con firma digitale: Ing. Angaramo Gabriele Key4-30-0033559

S.P.A.C. S.r.l. Ingegneria Strategica

ANGARAMO Ing. Gabriele

Sede Operativa: Via San Martino 1, 12040, Sant'Albano Stura (CN) -

Tel. 0172 659001 Fax. 0172 294908

mail: g.angaramo@libero.it - spacingegneria@gmail.com

Sede Legale: Via San Bernardo 19, 12045, Fossano (CN) Italy - Cod. Fisc. / P. IVA / Reg. imp. Cuneo 03226480048 - Capitale sociale € 50.000,00

Progetto / Commessa n.:	**Doc. n.:**
S- 13-60	S-13-60-REL00-00 viabilità.doc

Cliente:

BOTTA Lucia BOTTA Maria BOTTA Caterina BOTTA Sergio BOTTERO Elga BOTTERO Gianluca CHIAPELLA Maria Rosa COSTAMAGNA Domenico DOMPE' Claudio MAROCCO Eraldo FERRERO Adriana Caterina MARTINA Bruna GIUGGIA Mario

COMUNE DI FOSSANO

PROGETTO DI P.E.C. DA REALIZZARSI NELLA "ESPANSIONE SETTENTRIONALE DEL CENTRO CAPOLUOGO - COMPARTO SUD DEGLI AMBITI PROGETTO DELL'ESPANSIONE PEREQUATA"

Progettisti: ARCH. PATRESE – ARCH. PAGLIERO

VALUTAZIONE DI IMPATTO VIABILISTICO

REV.	Data emissione	Descrizione	Elaborato	Verificato/Approvato
03				
02				
01				
00	10/08/2012	Prima emissione	ANG	ANG/PAN

Indice

1 Introduzione 3
1.1 Copyright 3
2 Tipologia dell'insediamento, ubicazione e contesto di insediamento 4
2.1 Ubicazione e contesto di insediamento – elaborati grafici 4
3 VIABILITA': articolo 9 della l.r. del 29 dicembre 2006, n. 38 "Disciplina delle attività di somministrazione di alimenti e bevande" – allegato A 11
3.1 Viabilità dell'area 11
3.2 Livelli di servizio – analisi viabilistiche 12
3.2.1 Punti di rilievo 12
3.3 Via Santa Lucia 13
3.4 Via del Lucchetto 13
3.4.1 Metodologia standard di calcolo 14
3.5 LOS Ante operam 17
3.5.1 LOS Ante operam con analisi del massimo carico 19
3.6 Analisi post operam (caso peggiorativo) 20
3.6.1 LOS Post Operam 20
3.7 Innesti 21
3.8 Prescrizione 21
3.9 Conclusioni – Viabilità 21
3.9.1 DICHIARAZIONE DI RISPONDENZA 22
4 BIBLIOGRAFIA – NOTE DI CALCOLO –VIABILITA' - ACUSTICA 23
4.1 Metodologie di verifica – LIVELLI DI SERVIZIO (LOS) 23
4.2 Procedure di calcolo 25
4.2.1 Strade extra-urbane ad una corsia per senso di marcia 25
4.2.2 Intersezioni a raso lineari con vincolo di precedenza 28
4.3 Intersezioni semaforiche 32
4.4 Intersezioni a raso a rotatoria 36
4.5 Bibliografia 40

1 Introduzione

Il presente lavoro viene eseguito allo scopo di soddisfare le richieste della normativa vigente in materia di

A) Impatto viabilistico

Il documento viene richiesto dagli uffici tecnici competenti del **Comune di FOSSANO**

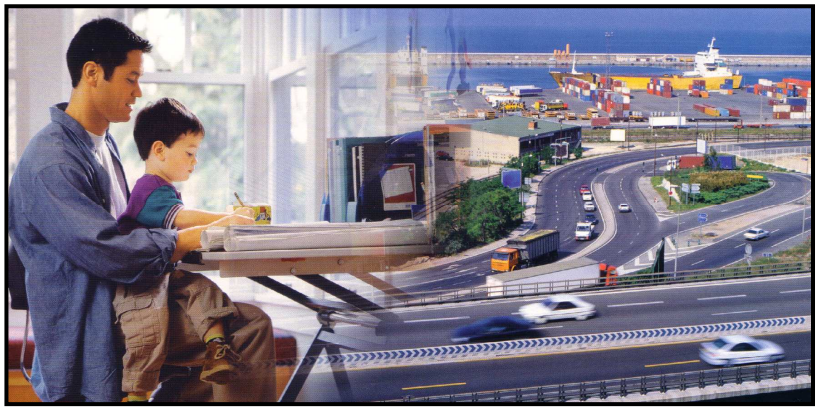


Figura 1 - Il comfort abitativo (Les Outils, Exemples de solutions acoustiques, May 2002)

1.1 Copyright

*Disegni architettonici inseriti nel documento nonché i render sono di proprietà **Arch. Pagliere / Patrese**

*I materiali commerciali indicati nel documento sono vincolanti per l'impresa esecutrice. La variazione delle vendor list proposte deve essere concertata con il committente e il tecnico in acustica nonché con la direzione lavori generale.

* Elaborati grafici, stralci di documentazione sia in digitale che in cartaceo vengono inseriti nel documento mettendo in chiara evidenza la ditta che commercializza il prodotto. Non viene apportata nessuna modifica ai documenti protetti da copyright.

*E vietata in qualunque modo, carteceo-digitale e/o similari, la divulgazione e duplicazione del documento senza espressa autorizzazione scritta da parte dell' Ing. Angaramo Gabriele. Ogni copia e/o stralcio riprodotto non autorizzato in forma scritta sarà perseguito in base ai termini di legge.

2 Tipologia dell'insediamento, ubicazione e contesto di insediamento

2.1 Ubicazione e contesto di insediamento – elaborati grafici

L'intervento oggetto di studio riguarda la realizzazione di un nuovo comparto residenziale da edificarsi presso il comune di Fossano – CN. L'area è in Via Santa Lucia – fronte stabilimento Balocco S.p.A.

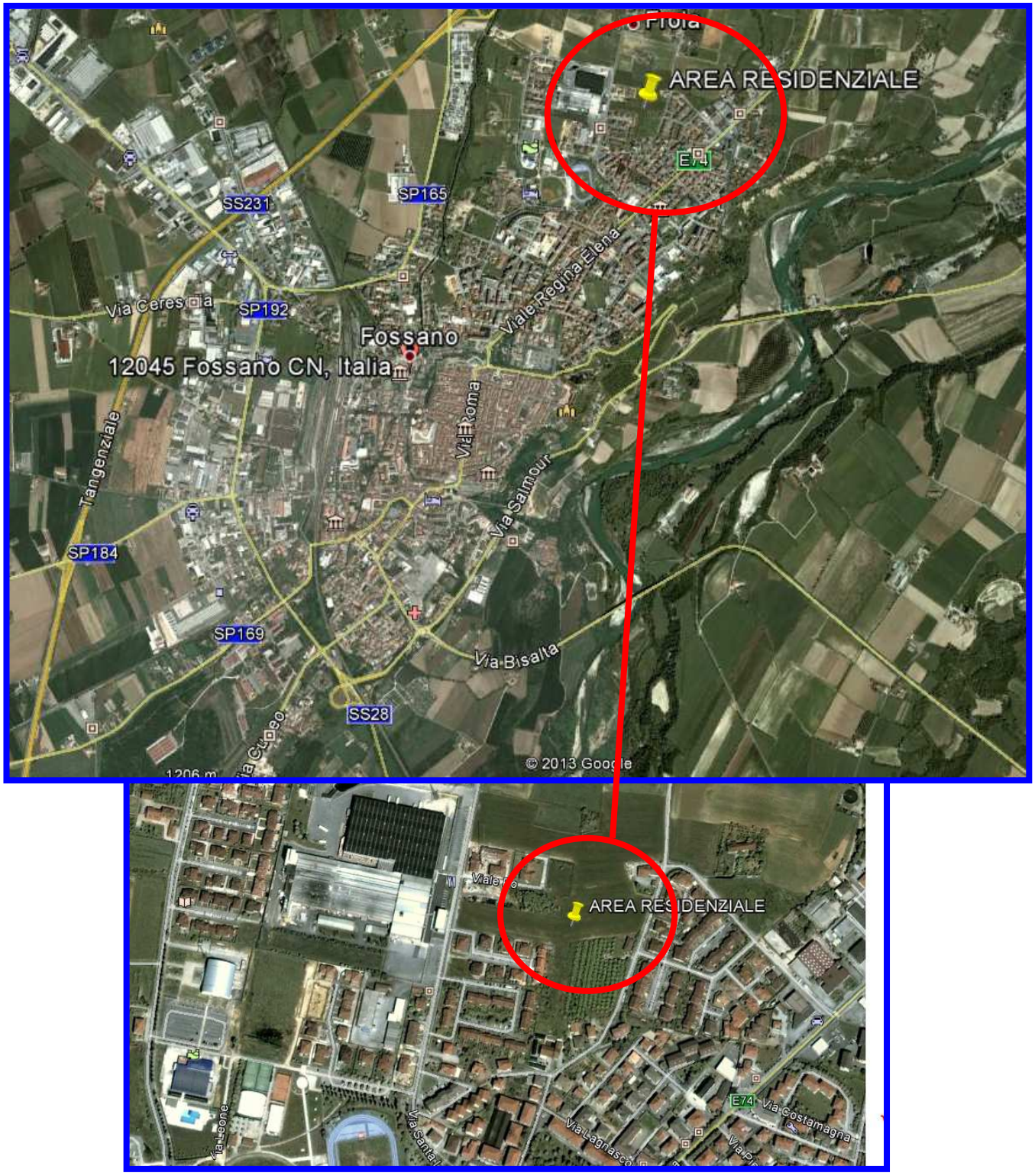


Figura 2 – localizzazione territoriale

Figura 3 – stralcio prgc

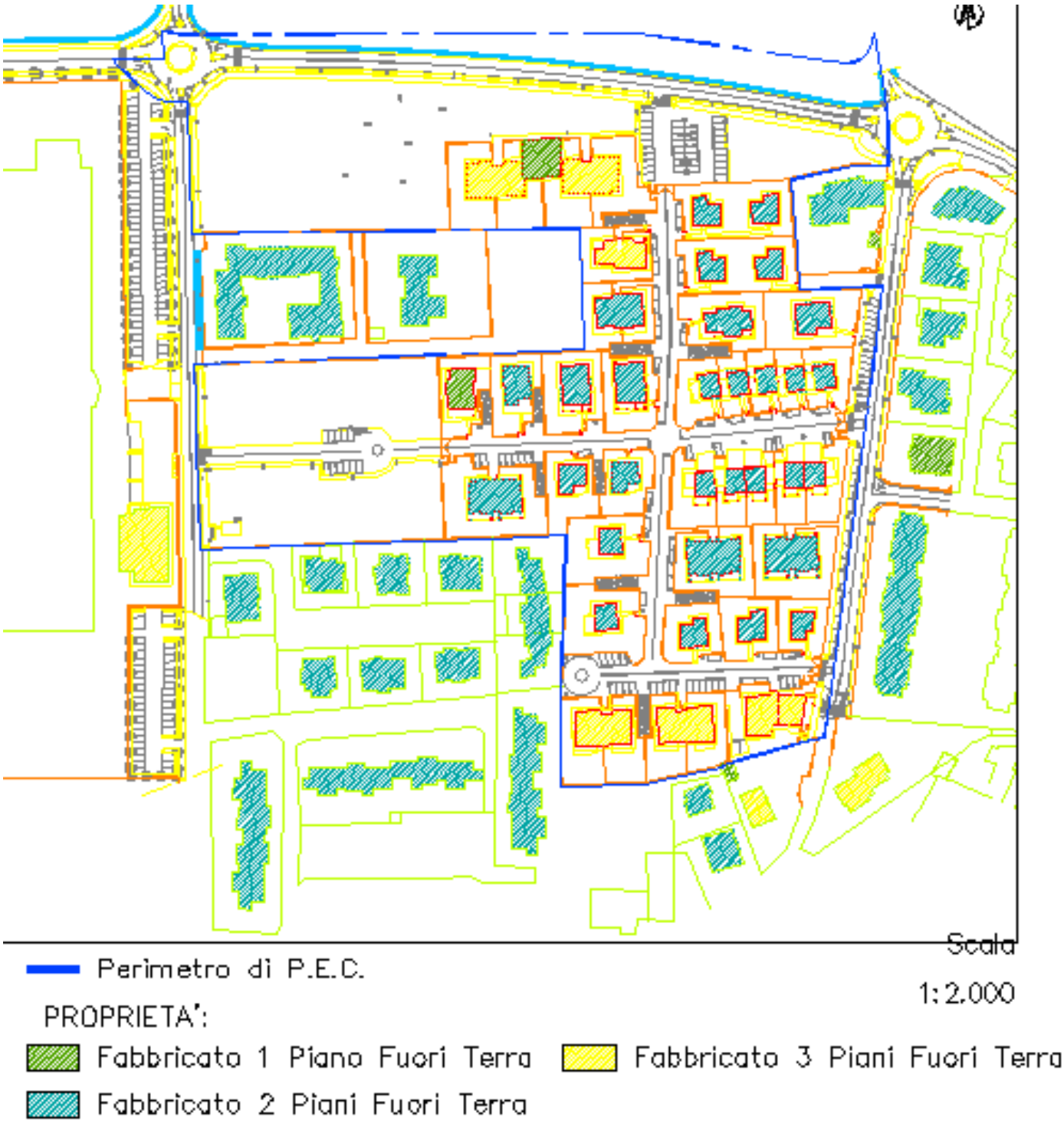


Figura 4 – PLANIMETRIA DI AREA

Figura 5 – disposizione edifici in PEC

Figura 6 – documentazione fotografica di area – Vista da Via Santa Lucia e Vista da Via del Lucchetto

Figura 7 - Via Santa Lucia

Figura 8 - Via del Lucchetto

3 VIABILITA': articolo 9 della l.r. del 29 dicembre 2006, n. 38 "Disciplina delle attività di somministrazione di alimenti e bevande" – allegato A

3.1 Viabilità dell'area

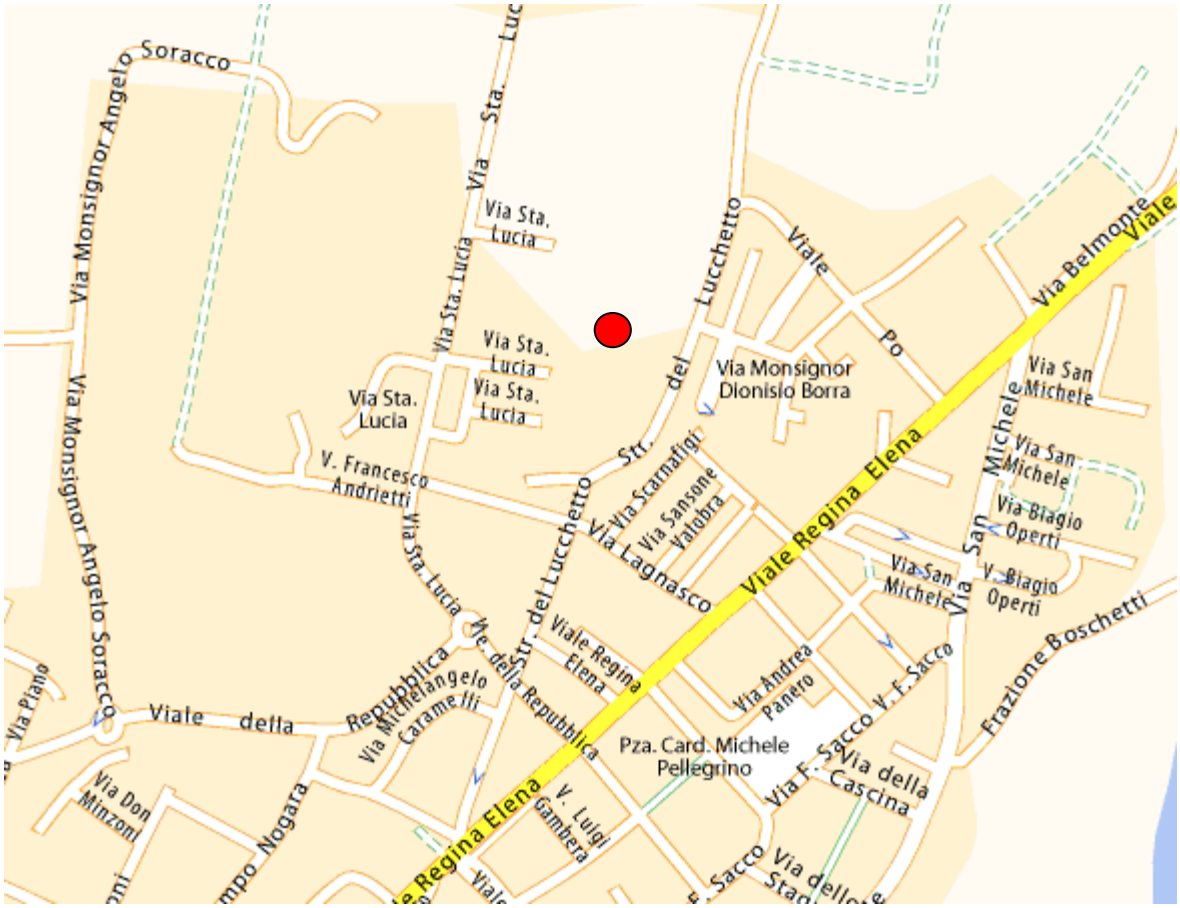


Figura 9 - punto di interesse viabilistico – localizzazione struttura

Dal punto di vista viabilistico la nuova area residenziale è servita dalle seguenti strade:

- Via Santa Lucia
- Via del Lucchetto

3.2 Livelli di servizio – analisi viabilistiche

Per la struttura oggetto di studio sono stati analizzati gli andamenti di traffico sulle 8-18 ore per n. 3 giorni significativi.

3-4-5 Aprile 2013

3.2.1 Punti di rilievo

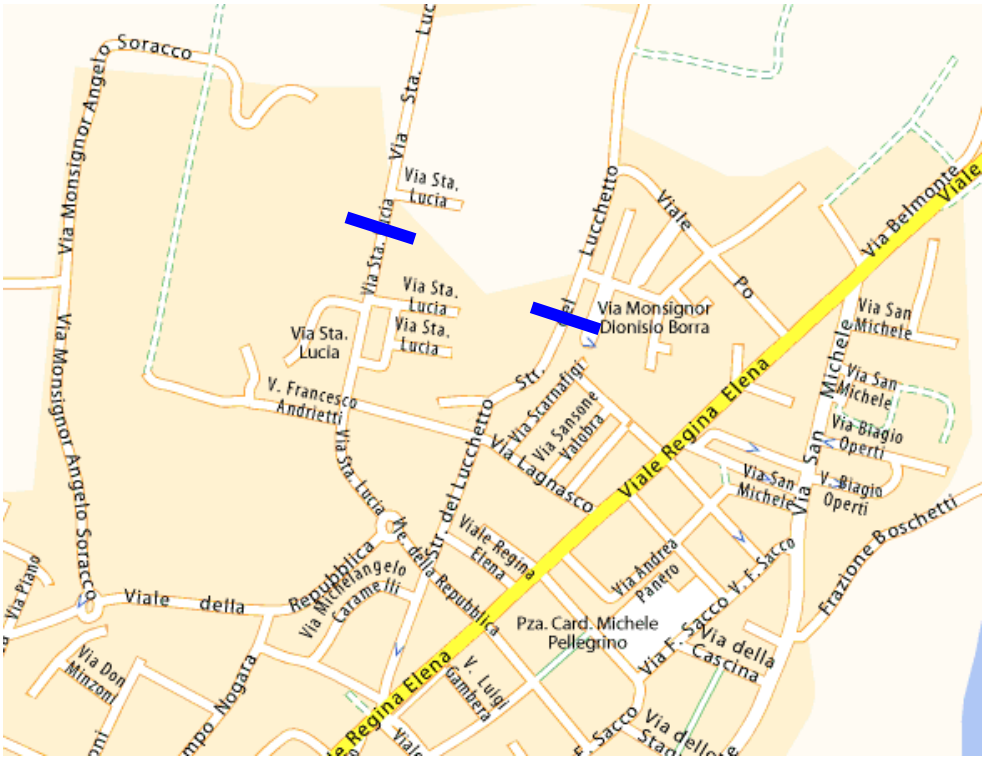


Figura 10 - punti di analisi significativi

3.3 Via Santa Lucia

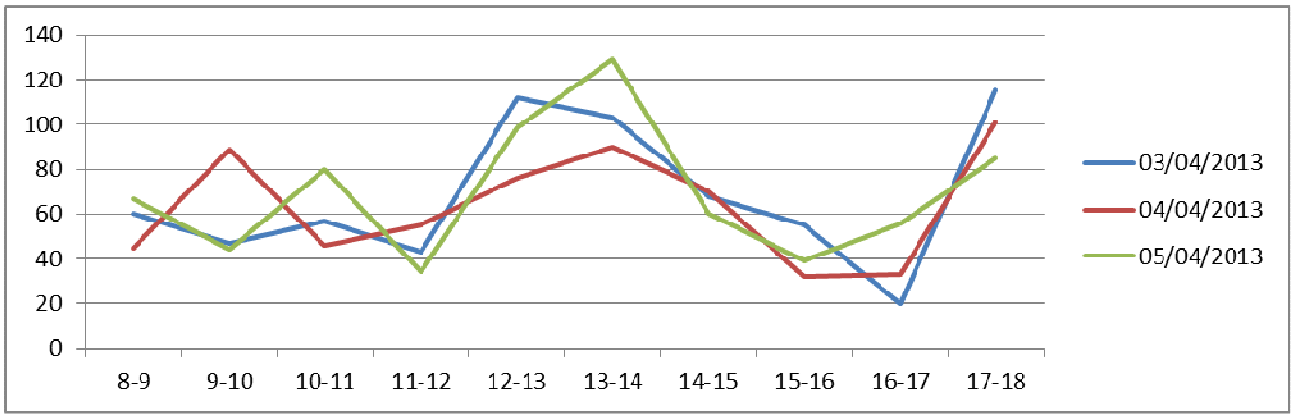


Figura 11 - andamento flussi di traffico - rilievi nei due sensi di marcia

3.4 Via del Lucchetto

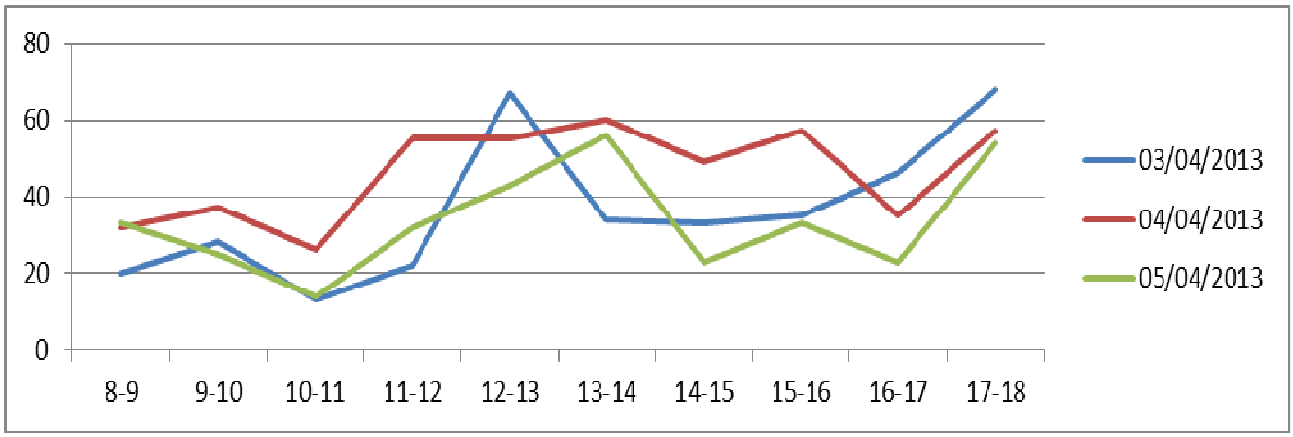
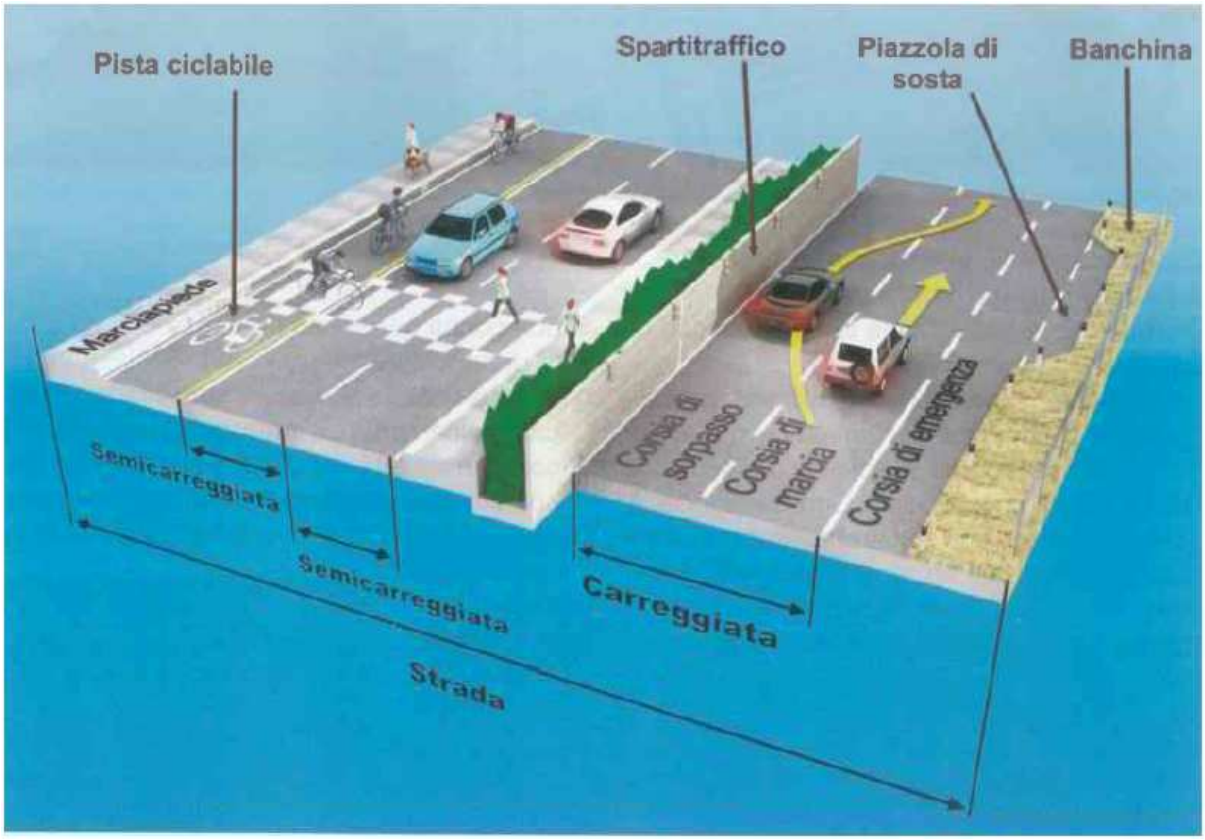


Figura 12 - rilievi su Via del Lucchetto

3.4.1 Metodologia standard di calcolo



L'analisi operativa per determinare capacità e livello di servizio, delle strade in oggetto, è stata condotta secondo le indicazioni dell'*Highway Capacity Manual del 1997*.

La metodologia di analisi per tracciati generali consente di valutare le condizioni operative medie del traffico lungo un tronco stradale sulla base del tipo di tracciato, della configurazione geometrica e delle condizioni del traffico.

Il *tracciato* (Terrain) può essere classificato come pianeggiante, ondulato o montagnoso in funzione dell'andamento altimetrico del tronco stradale.

La *configurazione geometrica* della strada comprende le caratteristiche del profilo longitudinale e della sezione trasversale della piattaforma stradale.

Le caratteristiche della sezione longitudinale sono descritte dalla percentuale media di aree con divieto di sorpasso (Percent No Passing Zones).

I dati relativi alla sezione della piattaforma stradale includono la larghezza delle corsie (Lane Width) e la larghezza utile delle banchine (Usable Shoulder Width).
I dati sul traffico, includono la portata oraria nei due sensi (Input Volume), la distribuzione di tale portata oraria nei due sensi di marcia (Directional Distribution) il fattore di punta oraria (Peak Hour Factor) e le percentuali di autocarri (Percentage of Trucks), di veicoli ricreativi (Percentage of Recreational Vehicles) e autobus (Percentage of Buses) presenti nella corrente di traffico.

Relazione generale

La relazione generale che descrive le operazioni di traffico sui tronchi di tracciato generale è descritta dalla formula seguente:

$$SF = 2.800 * (V/C) * fD * fW * fHV$$

dove SF indica l'intensità di flusso di traffico di servizio relativa a ciascun livello di servizio.
Nei risultati dell'analisi (Level of Service Results) sono riportate le SF dei cinque livelli di servizio e per confronto il livello di servizio dell'impianto (LOS for given conditions).
In pratica si considera una capacità ideale di 2.800 autovett./h che viene corretta per rispecchiare un rapporto V/C (portata/capacità) adeguato al livello di servizio, distribuzioni di traffico nei due sensi che si discostano dal 50/50, restrizioni della larghezza delle corsie, banchine strette ed infine veicoli pesanti nella corrente di traffico.
In dettaglio si avranno:

Correzione per il rapporto V/C (V/C)

I valori V/C variano in funzione del livello di servizio considerato, del tipo di morfologia dell'impianto e dell'entità delle limitazioni di sorpasso.

Si deve notare che i rapporti V/C anche a capacità sono minori di 1 per tracciati ondulati o montagnosi, poiché la capacità ideale non è raggiungibile su configurazioni critiche.

Correzione per la distribuzione nei due sensi (fD)

Per distribuzioni di traffico nei due sensi diverse da 50/50 su una strada a due corsie occorre applicare un appropriato coefficiente riduttivo.

Correzione per corsie strette e limitata larghezza delle banchine (fW)

Tale fattore si introduce poiché le corsie strette inducono gli automobilisti a transitare più vicino ai veicoli nell'opposta corsia di quanto non sarebbe normalmente desiderabile.

Anche le banchine di larghezza limitata hanno un effetto analogo, in quanto i conducenti tendono a "schivare" gli oggetti sul margine stradale.

Gli automobilisti compensano il loro avvicinamento ai veicoli sopravvenienti, rallentando o lasciando distanziamenti più ampi in tempo tra i veicoli nella stessa corsia. Entrambe le reazioni portano a più basse intensità di traffico rispetto a quelle possibili ad una data velocità.

Correzione per i veicoli pesanti nella corrente di traffico (fHV)

Questo fattore rispecchia la presenza di veicoli pesanti nella corrente di traffico.

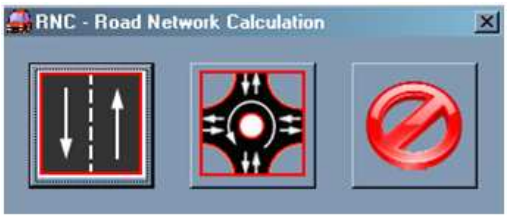
Tutti i veicoli che hanno soltanto quattro ruote a contatto con la pavimentazione possono essere considerati equivalenti alle autovetture (furgoni e autocarri leggeri).

Vengono invece classificati veicoli pesanti gli autocarri, i veicoli ricreativi e gli autobus e la corrente di traffico è caratterizzata dalla loro proporzione nella composizione del traffico.

L'effetto negativo di veicoli pesanti sulle strade a due corsie aumenta notevolmente a misura che il tracciato diventa più critico. Questo effetto è complicato dalle limitazioni delle distanze di visibilità per il sorpasso che spesso si accompagnano alla criticità del tracciato e portano ad un serio deterioramento della portata di traffico.

3.5 LOS Ante operam

Dai rilievi precedentemente esposti si procede con il calcolo del livello di servizio ante operam.



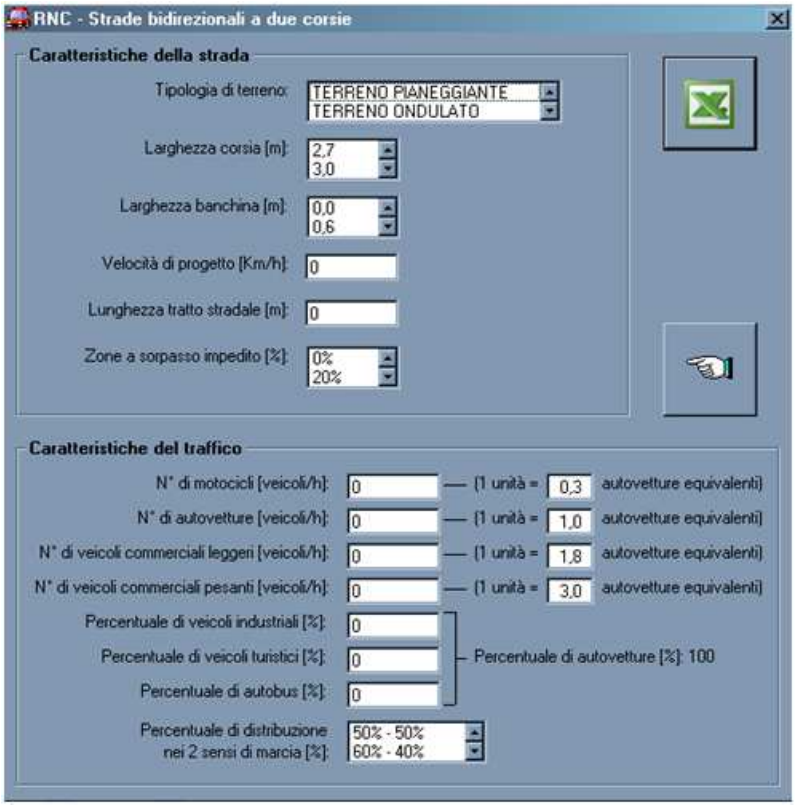


Immagine 1 – modalità caricamento dati - dorsali analizzate

Software RNC licenza 12as784445 (Ing. Angaramo)

CALCOLO:

$\nu = V / PHF$

dove:

ν	è il flusso veicolare in entrambe le direzioni espresso in vph (autovetture equivalenti per ora)
V	è il volume orario totale nell'ora di punta in entrambe le direzioni espresso in vph (autovetture equivalenti per ora)
PHF	è il fattore dell'ora di punta ("Peak Hour Factor")

$SF_i = 2800 \cdot (\nu/c)_i \cdot f_d \cdot f_W \cdot f_{HV}$

dove:

SF_i	è il flusso totale in entrambe le direzioni di marcia per l'i-esimo livello di servizio, in vph
$(\nu/c)_i$	è il rapporto tra il flusso e la capacità ideale per l'i-esimo livello di servizio
f_d	è il fattore di correzione per la distribuzione del traffico nelle due direzioni di marcia
f_W	è il fattore di correzione per la ridotta larghezza delle corsie e delle banchine
f_{HV}	è il fattore di correzione per la disomogeneità del traffico (presenza di autobus, veicoli industriali e/o veicoli turistici)

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1) + P_B \cdot (E_B - 1)}$$

dove:

P_T, P_R, P_B	sono rispettivamente la porzione di veicoli industriali, veicoli turistici ed autobus espresse in decimali
E_T, E_R, E_B	sono rispettivamente le autovetture equivalenti per veicoli industriali, veicoli turistici ed autobus

LOS	$(\nu/c)_i$	f_d	f_W	E_T	E_R	E_B	P_T	P_R	P_B	f_{HV}	SF_i
A	0,07	1	0,68	2,0	2,2	1,8	0,02	0,01	0,01	0,96	128
B	0,19	1	0,68	2,2	2,5	2,0	0,02	0,01	0,01	0,95	344
C	0,34	1	0,68	2,2	2,5	2,0	0,02	0,01	0,01	0,95	615
D	0,59	1	0,68	2,0	1,6	1,6	0,02	0,01	0,01	0,97	1090
E	**1,00**	**1**	**0,81**	**2,0**	**1,6**	**1,6**	**0,02**	**0,01**	**0,01**	**0,97**	**2200**
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>2200

3.5.1 LOS Ante operam con analisi del massimo carico

Figura 13 – Livelli di servizio sulle dorsali analizzate – le analisi del massimo carico si verificano con periodi di incidenza oraria diversi per ogni dorsale analizzata

Non si verificano livelli di servizio critici. Entrambe le dosrsali analizzate rientrano nei LOS A.

3.6 Analisi post operam (caso peggiorativo)

Si procede alla verifica con l'immissione di 200 Veq/h sia su Via del Lucchetto che su Via Santa Lucia.

I 200 Veq/h derivano dalle potenzialità veicolari del comparto residenziale.

3.6.1 LOS Post Operam

Figura 14 – Livelli di servizio Post operam

3.7 Innesti

Visti i livelli di servizio non si verificano criticità sia per quanto concerne la nuova rotatoria in progetto su Via Santa Lucia che la Viabilità su Via del Lucchetto.

3.8 Prescrizione

Non sono necessarie prescrizioni rilevanti se non l'applicazione di una idonea cartellonistica di accessibilità all'area .

3.9 Conclusioni – Viabilità

In riferimento alle analisi sopra descritte si dichiara quanto segue:

- La nuova area residenziale non inficia in forma significativa dal punto viabilistico sulle strade analizzate;
- Nelle zone limitrofe all'area residenziale la disponibilità dei parcheggi è elevata ed è conforme agli standar urbanistici di riferimento;
- Non si verificano interferenze e criticità di circuitazione dovuti all'attesa per la sosta;
- Non si verificano condizioni di svolta a sinistra con difficoltà di manovra;
- Il livello di servizio non viene modificato dalla fase ANTE operam alla fase POST operam in forma significativa;
- Lo stato dei luoghi è compatibile con la nuova area residenziale in oggetto.

3.9.1 DICHIARAZIONE DI RISPONDENZA

Si dichiara che i rilievi di traffico sono stati effettuati in data

Date rilevamento: 3-4-5 Aprile 2013

Rilievi manuali e automatici.

In particolare i rilievi sono stati effettuati a mezzo di contatore di veicoli manuale e automatico tramite telecamera.

I rilievi sono stati effettuati nei giorni indicati nel documento in alternativa alla regolamentazione regionale.

Ing. ANGARAMO Gabriele

Operatori:

Anita Dompè – Petitti Paolo – Curti Daniele – Annalisa Sampò

I dati forniti all'interno del documento non possono essere riprodotti e/o utilizzati per rielaborazioni tecnico-grafiche senza l'autorizzazione scritta dello scrivente.

Tacito assenso verso gli organo competenti (Ministero-Regione-Provincia-ARPA ecc..)

4 BIBLIOGRAFIA – NOTE DI CALCOLO –VIABILITA' - ACUSTICA

4.1 Metodologie di verifica – LIVELLI DI SERVIZIO (LOS)

Le procedure di calcolo utilizzate per la valutazione prestazionale delle diverse infrastrutture e dei relativi flussi di traffico riprendono principalmente le metodologie formulate dal noto manuale statunitense di riferimento per la circolazione stradale *Highway Capacity Manual* (HCM).
I Criteri Regionali prescrivono una serie di verifiche da condurre sulle principali arterie stradali interessate dal traffico indotto, sui relativi nodi e sulle intersezioni; tali verifiche hanno come finalità la valutazione dei seguenti parametri quali indici del livello prestazionale delle infrastrutture:

- il Livello di Servizio (*Level Of Service* - LOS) delle strade e delle intersezioni;
- la lunghezza media delle code;
- i tempi medi di ritardo;
- la qualità del servizio;
- l'organizzazione complessiva del sistema della viabilità di accesso/egresso e di distribuzione.

L'analisi mediante la quale è possibile descrivere la qualità della circolazione, di cui è indice il Livello di Servizio, è basata sullo studio del cumulo degli oneri che ogni utente sostiene nel servirsi dell'infrastruttura:

- costi monetari del viaggio;
- tempo speso;
- stress fisico e psicologico.

Per questa analisi la conoscenza della distribuzione delle portate orarie durante tutto un anno, oltre agli oneri sopra elencati, è strettamente legata alla valutazione dei parametri che caratterizzano la circolazione e cioè:

- tipologia e geometria dell'arco stradale o dell'intersezione;
- libertà di manovra (per esempio la possibilità di marciare alla velocità desiderata);
- numero medio dei sorpassi;
- interruzione del flusso: numero e durata dei perditempo;
- velocità media.

Le condizioni operative di un flusso sono così individuate attraverso un vettore pluridimensionale le cui componenti non sono sempre suscettibili di rappresentazione scalare.
L'espressione del Livello di Servizio attraverso una grandezza così complessa, quale quella sopra definita, pone rilevanti problemi sia nel calcolo e nella quantificazione dei parametri che definiscono la predetta qualità di circolazione, sia nel precisarne la legge di variabilità con la portata.
Il manuale delle capacità delle strade dell'*American Association of State Highway Officials* (AASHO) propone di limitare la valutazione del Livello di Servizio a due sole componenti di immediata valutazione:

- la velocità media in un dominio spazio-temporale X-T;
- la portata *Q* e/o l'intensità di traffico *v*.

Al fine di meglio comprendere come le suddette grandezze possano caratterizzare la qualità della circolazione, si riporta di seguito il significato delle stesse.
Per *velocità media* si intende il rapporto tra la lunghezza del tratto in esame e la media dei tempi di viaggio di tutti i veicoli che vi transitano in un prefissato intervallo di tempo.
Per *portata stradale* si intende il numero medio *Q* di passaggi di veicoli attraverso una sezione stradale riferiti ad un'unità temporale (generalmente l'ora: *flusso orario*).
Per *capacità* si intende il valore limite delle portate *Q*; la *capacità* dipende anche dal comportamento dei veicoli della corrente e non va quindi interpretata in senso deterministico ma come quella portata che ha sufficiente probabilità di non essere superata.

Per *intensità di traffico* si intende l'equivalente intensità oraria rilevata in un punto o sezione di una corsia, o carreggiata durante un prefissato intervallo di tempo minore di un'ora (generalmente 15 minuti).
Da un'attenta analisi del significato delle grandezze suddette è possibile constatare che, mentre la *velocità media* riflette le funzioni di mobilità caratterizzando abbastanza chiaramente gli oneri dell'utente nei confronti del tempo di percorrenza del tronco stradale, il rapporto tra l'*intensità di traffico* e la *capacità* esprime un indice della libertà di guida, della sicurezza e dell'economia del trasporto, nonché del comfort.
I diversi Livelli di Servizio sono definiti con sei lettere, da A ad F, in ordine decrescente di qualità di condizioni di deflusso, e vengono delimitati da specifici valori dei parametri velocità, percentuale del tempo di viaggio trascorsa in plotoni, tempo di ritardo, densità e rapporto tra flusso di traffico e capacità della sezione stradale, nonché dall'andamento delle code nelle intersezioni.
La qualità della circolazione rappresentata dai sei differenti Livelli di Servizio e così definita:

- *livello A*: condizioni di flusso libero, bassi volumi di traffico ed elevate velocità. Le velocità sono limitate soltanto dalle prestazioni del veicolo; comfort elevato;
- *livello B*: condizioni di flusso stabile, le velocità risultano influenzate in modo lieve dalla condizione della circolazione e i conducenti hanno ancora la possibilità di scegliere la velocità desiderata; comfort discreto;
- *livello C*: condizioni di flusso stabile, la velocità possibile risulta ancora soddisfacente anche se i conducenti saranno in un certo modo condizionati nella scelta della velocità e nelle manovre all'interno della corrente veicolare; comfort medio;
- *livello D*: condizioni prossime al flusso instabile, le velocità risultano ancora accettabili anche se notevolmente influenzate dalle oscillazioni delle portate. I conducenti hanno limitata libertà di manovra e relativa sicurezza di marcia; comfort medio-basso;
- *livello E*: condizione in cui le portate orarie si avvicinano o raggiungono la capacità della strada (condizione di saturazione); le velocità sono modeste e pressoché uniformi; il flusso è instabile e possono aversi anche temporanei arresti dei veicoli; comfort basso;
- *livello F*: condizioni di flusso forzato, si hanno densità elevate a cui corrispondono velocità possibili anche nulle con marcia tipo *stop and go* e portate orarie molto basse (inferiori alla capacità della strada).

I Livelli di Servizio possono essere calcolati sia per una tratta stradale che per una qualsiasi intersezione (normale, semaforizzata o a rotatoria); di seguito vengono riportate le procedure di calcolo relative ai diversi casi analizzati.

4.2 Procedure di calcolo

4.2.1 Strade extra-urbane ad una corsia per senso di marcia

Le strade extra-urbane ad unica carreggiata con una sola corsia per senso di marcia (*two line highways*) sono strade sulle quali la qualità della circolazione è fortemente influenzata dalla difficoltà di eseguire sorpassi, che costringe i veicoli a spendere parte del tempo di viaggio in coda dietro veicoli più lenti. I livelli di servizio sono definiti in funzione della percentuale del tempo di viaggio speso in attesa di sorpassare, della velocità media di viaggio e del rapporto tra il flusso di traffico e la capacità. Le condizioni ideali per una strada bidirezionale a due corsie (HCM-1994) sono le seguenti:

- corsie larghe non meno di 3,60 m;
- banchine larghe non meno di 1,80 m;
- velocità di progetto maggiore o uguale a 100 Km/h;
- andamento plano-altimetrico del tracciato tale da consentire sempre il sorpasso (distanza di visibilità non minore di 450 metri);
- corrente di traffico costituita da sole autovetture;
- uguale distribuzione del traffico nelle due direzioni di marcia;
- assenza di semafori e/o impedimenti nelle manovre di svolta;
- terreno pianeggiante.

La capacità di una strada bidirezionale a due corsie è notevolmente influenzata dalla distribuzione della portata nei due sensi di marcia. Il valore massimo si ha in corrispondenza di una ripartizione uniforme (50/50) e vale in totale 2800 *pcphpln* (*Passengers Cars Per Hour Per Lane*, cioè numero di autovetture per ora per corsia) in entrambe le direzioni di marcia.
Poiché i terreni sui quali si ergono le infrastrutture in esame sono prevalentemente pianeggianti, è possibile desumere i valori numerici degli elementi caratterizzanti ciascun livello di servizio dalla tabella seguente.

LdS	% di tempo d'attesa	RAPPORTO v/C																	
		Terreno Pianeggiante						*Terreno Ondulato*						*Terreno Montuoso*					
		Velocità media	% Zone con sorpasso impedito						Velocità media	% Zone con sorpasso impedito						Velocità media	% Zone con sorpasso impedito					
			0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100		0	20	40	60	80	100
A	< 30	≥ 93	.15	.12	.09	.07	.05	.04	≥ 92	.15	.10	.07	.05	.04	.03	≥ 90	.14	.09	.07	.04	.02	.01
B	≤ 45	≥ 88	.27	.24	.21	.19	.17	.16	≥ 87	.26	.23	.19	.17	.15	.13	≥ 87	.25	.20	.16	.13	.12	.10
C	≤ 60	≥ 84	.43	.39	.36	.34	.33	.32	≥ 82	.42	.39	.35	.32	.30	.28	≥ 79	.39	.33	.28	.23	.20	.16
D	≤ 75	≥ 80	.64	.62	.60	.59	.58	.57	≥ 79	.62	.57	.52	.48	.46	.43	≥ 72	.5S	.50	.45	.40	.37	.33
E	≤ 75	≥ 72	1	1	1	1	1	1	≥ 64	.97	.94	.92	.91	.90	.90	≥ 56	.91	.87	.84	.82	.80	.78
F	100	< 72	-	-	-	-	-	-	< 64	-	-	-	-	-	-	< 56	-	-	-	-	-	-

Tabella 01 – Rapporto portata/capacità (v/c)

L'analisi delle strade bidirezionali a due corsie richiede la preventiva conoscenza del flusso veicolare nei 15 minuti più intensi dell'ora di punta. L'equazione da applicare è la seguente:

$$v = \frac{V}{PHF}$$

dove:

- *v* è l'intensità di traffico di servizio, cioè il flusso veicolare orario (in entrambe le direzioni) che si ottiene moltiplicando per quattro il flusso massimo misurato nei 15 minuti più intensi dell'ora di punta ed è espresso in *vph* (*vheicles per hour*, cioè numero di veicoli all'ora);

- *V* è il volume orario totale misurato nell'ora di punta (in entrambe le direzioni), espresso in *vph*;
- *PHF* (*Peak Hour Factor*) è il fattore dell'ora di punta.

Qualora non si abbiano a disposizione dati specifici derivanti da osservazioni sperimentali, per stimare il valore di *PHF* si utilizzano i valori riportati nella tabella seguente.

Volume orario totale (veic/h)	Fattore dell'ora di punta (PHF)	Volume orario totale (veic/h)	Fattore dell'ora di punta (PHF)
100	0.83	1000	0.93
200	0.87	1100	0.94
300	0.90	1200	0.94
400	0.91	1300	0.94
500	0.91	1400	0.94
600	0.92	1500	0.95
700	0.92	1600	0.95
800	0.93	1700	0.95
900	0.93	1800	0.95
		1900	0.96

Tabella 02 – Fattore dell'ora di punta *PHF* (*Peak Hour Factor*)

Nel caso generale in cui le pendenze non superino il 3% o quando le lunghezze dei vari tronchi siano minori di 800 metri, il flusso veicolare totale SF_i (in entrambe le direzioni di marcia) corrispondente all'*i*-esimo livello di servizio è dato dalla seguente equazione:

$$SF_i = 2800 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)_i \cdot f_d \cdot f_W \cdot f_{HV}$$

dove:

- $\left(\frac{v}{c}\right)_i$ è il rapporto tra la portata e la capacità ideale, relativo al livello *i*-esimo (tabella 01);
- f_d è il fattore di correzione per la distribuzione del traffico non omogenea nelle due direzioni di marcia (tabella 03);
- f_W è il fattore di correzione per la ridotta larghezza delle corsie e delle banchine, relativo al livello *i*-esimo (tabella 04);
- f_{HW} è il fattore di correzione per la disomogeneità del traffico (presenza di autobus, veicoli industriali e/o veicoli turistici), calcolato con la seguente equazione:

$$f_{HW} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1) + P_B \cdot (E_B - 1)}$$

dove:

- P_T, P_R, P_B rappresentano rispettivamente la porzione di veicoli industriali, veicoli turistici ed autobus, in decimali;
- E_T, E_R, E_B rappresentano rispettivamente le autovetture equivalenti per veicoli industriali, veicoli turistici ed autobus (tabella 05).

Distribuzione direzionale	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50
Fattore correttivo f_d	*0.71*	*0.75*	*0.83*	*0.89*	*0.94*	*1.00*

Tabella 03 – Fattore f_d

Distanza del margine della corsia dall'ostacolo(m)	*Corsia di 3,60 m*		*Corsia di 3,30 m*		*Corsia di 3,00 m*		*Corsia di 2,70 m*	
	LdS A-D	LdS E	LdS A-D	LdS E	LdS A-D	LdS E	LdS A-D	LdS E
≥ 1,80	1,00	1,00	0,93	0,94	0,84	0,87	0,70	0,76
1,20	0,92	0,97	0,85	0,92	0,77	0,85	0,65	0,74
0,60	0,81	0,93	0,75	0,88	0,68	0,81	0,57	0,70
0,00	0,70	0,88	0,65	0,82	0,58	0,75	0,49	0,66

Tabella 04 – Fattore f_w

Tipo di veicolo	LDS	TIPO DI TERRENO		
		Pianeggiante	*Ondulato*	*Montuoso*
Autocarri E_t	A	2,0	4,0	7,0
	B e C	2,2	5,0	10,0
	D e E	2,0	5,0	12,0
Veicoli da diporto E_r	A	2,2	3,2	5,0
	B e C	2,5	3,9	5,2
	D e E	1,6	3,3	5,2
Autobus E_b	A	1,8	3,0	5,7
	B e C	2,0	3,4	6,0
	D e E	1,6	2,9	6,5

Tabella 05 – Valori delle autovetture equivalenti

4.2.2 Intersezioni a raso lineari con vincolo di precedenza

Si consideri il comportamento dell'autista di un veicolo il quale, giunto alla linea di STOP in prossimità di una intersezione sprovvista di segnalazione semaforica, è in attesa di attraversare la corrente ed eseguire la sua manovra. Egli osserva gli intervalli fra i veicoli della corrente e, non appena giudica uno di questi sufficientemente ampio, esegue la sua manovra. L'ampiezza dell'intervallo accettato varia da un autista all'altro in funzione delle sue caratteristiche: età, sesso, condizioni psicologiche. Alcuni autisti accettano un intervallo solo quando è tanto ampio da garantire una manovra sicura, altri accettano intervalli alquanto più piccoli, eventualmente costringendo al rallentamento il veicolo che sopraggiunge nella corrente da attraversare.

Si può definire per ogni automobilista un *intervallo critico T*, tale che tutti gli intervalli ad esso inferiori vengono rifiutati, mentre quelli più grandi sono accettati. L'intervallo critico è distribuito in maniera aleatoria nella popolazione dei conducenti, ed esistono tecniche sperimentali che consentono di calcolarne la legge di probabilità.

Nello studio dei fenomeni di attesa riguardanti la geometria stradale si suppone per semplicità che, nel caso di semplice attraversamento di una corrente di traffico (come avviene ad esempio nelle corsie di accumulo per svolta a sinistra), l'intervallo critico sia lo stesso per tutti i conducenti, uguale alla mediana della effettiva distribuzione di probabilità. I risultati di numerose misure sperimentali concordano nell'assegnare ad esso un valore compreso fra 7 e 8 sec.

In un fenomeno di attesa gli elementi che ne determinano le caratteristiche sono la portata che alimenta la coda ed il *tempo di servizio*, cioè il tempo che un utente giunto alla testa della coda deve aspettare prima di potersi allontanare. Nella generalità dei casi il tempo di servizio *s* è dato dalla somma dell'intervallo critico più gli intervalli della corrente da attraversare che vengono rifiutati.

Il tempo di servizio è quindi una variabile aleatoria, i cui parametri della legge di probabilità sono funzioni dell'intervallo critico T e della portata Q_1 della corrente da attraversare.

Indicando con Q_2 la portata della corrente di veicoli in attesa, nell'ipotesi che questi ultimi si succedano lungo tale corrente con legge poissoniana, le espressioni del tempo medio di attesa E_W e del numero medio E_q di veicoli in attesa sono:

$$E_W = b + \frac{Q_2 \cdot \left(b^2 + Var[s]\right)}{2 \cdot \left(1 - Q_2 \cdot b\right)} \tag{1}$$

$$E_q = Q_2 \cdot E_W \tag{2}$$

dove b e $Var[s]$ sono rispettivamente la media e la varianza del tempo di servizio, funzioni, come si è detto, dell'intervallo critico T e della portata Q_1 della corrente da attraversare.

Nelle figure 01 e 02 è riportato l'andamento del tempo medio di attesa e del numero medio di veicoli in attesa in funzione della portata Q_2 della corrente che giunge allo STOP, per un intervallo critico $T = 7$ secondi e per diversi valori della portata Q_1 della corrente da attraversare.

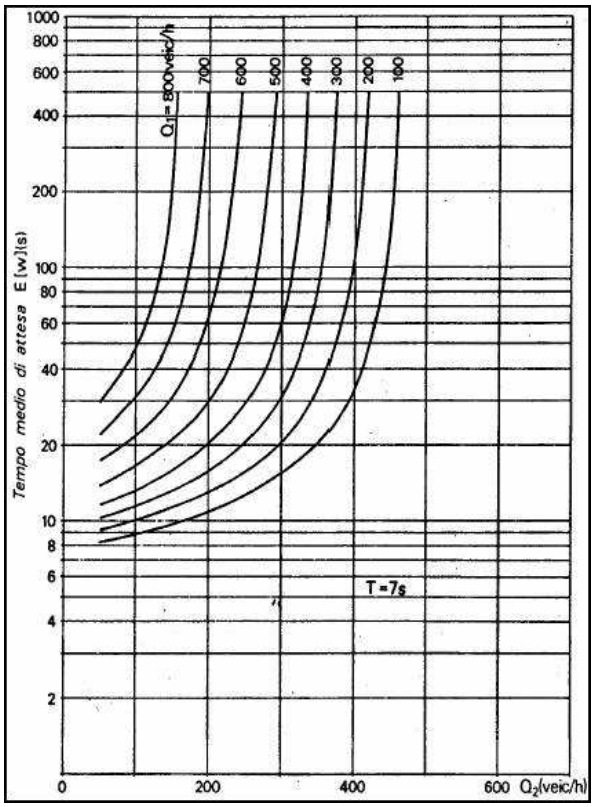


Figura 01 – Tempo medio di attesa nel caso di attraversamento di una corrente

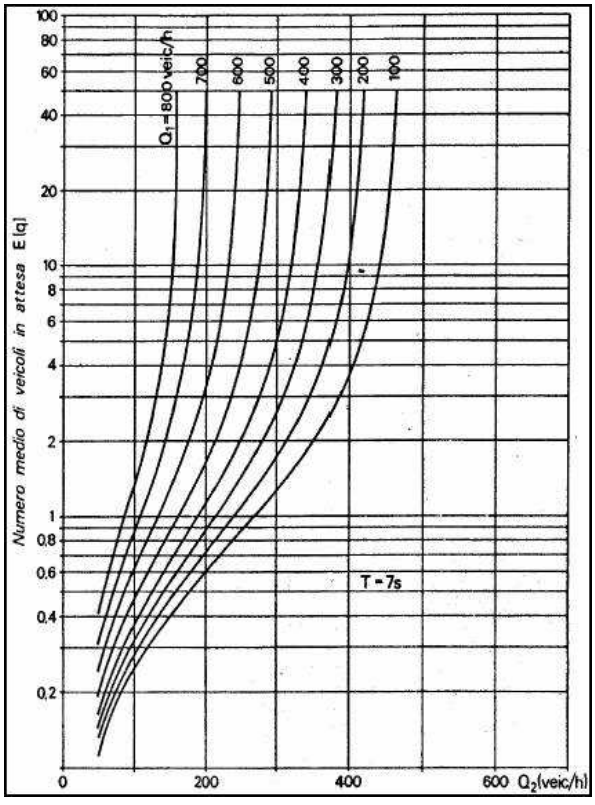


Figura 02 – Numero medio di veicoli in attesa nel caso di attraversamento di una corrente

Nel caso di una manovra di immissione la lunghezza della coda e i tempi di attesa dei veicoli che vogliono immettersi si determinano con gli stessi criteri che visti nel caso di semplice attraversamento di una corrente di traffico. In questo caso, però, è fondamentale conoscere la legge di variazione dell'intervallo critico con la velocità dei veicoli della corrente principale in cui avviene l'immissione, nell'ipotesi che tutti i veicoli transitino dinanzi alla linea dello STOP con la stessa velocità (che può essere assunta uguale alla media di quelle osservate).

Affinché l'immissione di un veicolo sia tale che il veicolo che segue quello che si sta immettendo non sia costretto a rallentare, è necessario che, nell'istante in cui il veicolo che è partito con velocità nulla dallo STOP ha raggiunto la velocità di quello che lo segue, quest'ultimo si trovi a una distanza non inferiore a quella di sicurezza. Il più piccolo intervallo temporale tra due veicoli della corrente principale, che consente un'immissione di questo tipo, è l'intervallo critico.

Se indichiamo con δ la distanza temporale di sicurezza fra due veicoli della corrente principale (che si può porre pari ad 1 secondo), l'intervallo critico è dato da:

$$T = \frac{v}{2 \cdot a} + 2 \cdot \delta$$

dove v è la velocità media della corrente principale e a è l'accelerazione con cui avviene l'immissione, che si può assumere pari a 1,2 m/s^2.

Il valore così calcolato di T va inserito nelle espressioni che danno la media e la varianza del tempo di servizio s, al fine di calcolare il tempo medio di attesa E_W e il numero medio di veicoli in attesa E_q. La media e la varianza del tempo di servizio hanno le espressioni:

$$E[s] = T + \frac{e^{KQ_1T - \sum_{i=0}^{K} \frac{(KQ_1T)^i}{i!}}}{Q_1 \cdot \sum_{i=0}^{K-1} \frac{(KQ_1T)^i}{i!}} \qquad (3)$$

$$Var[s] = \frac{(K+1) \cdot \left[e^{KQ_1T} - \sum_{i=0}^{K+1} \frac{(KQ_1T)^i}{i!} \right]}{KQ_1^2 \cdot \sum_{i=0}^{K-1} \frac{(KQ_1T)^i}{i!}} + (E[s] - T)^2 \qquad (4)$$

In queste espressioni il parametro K è legato alla portata Q_1 dalla relazione che è mostrata in forma grafica nella figura 03. Nelle formule precedenti a K vanno assegnati solo valori interi.

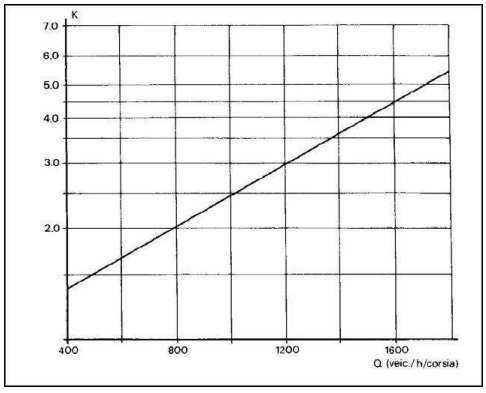


Figura 03 – $K = K(Q_1)$, relazione fra portata Q_1 e parametro K

Ottenuti i valori di *E[s]* e di *Var[s]*, si calcolano con le (1) e (2) la media E_q del numero di veicoli in coda e la media E_W dei tempi di attesa in coda.

Nel caso in cui l'immissione avvenga senza STOP, l'intervallo critico è dato da:

$$T = \frac{v - v_i}{2 \cdot a} + 2 \cdot \delta \tag{5}$$

in cui si pone sempre $\delta = 1$ secondo e $a = 1{,}2$ m/s^2.
Nell'espressione precedente v_i è la velocità media della corrente che vuole immettersi.
Al posto della portata Q_i si deve introdurre la portata virtuale Q^*:

$$Q^* = Q_1 \cdot \frac{v - v_i}{v} \tag{6}$$

Sostituendo le espressioni (5) e (6) nelle (3) e (4), si ricava dalla (1) il tempo medio di attesa per l'immissione.
Una volta calcolato il tempo medio di attesa si può determinare il livello di servizio relativo utilizzando la tabella seguente.

Level of Service	Ave. Control Delay (sec/veh)	Characteristics
A	0 - 10	Describes operations with very low levels of delay
B	> 10 - 15	Describes operations with low levels of delay
C	>15 - 25	Describes operations with average delays
D	>25 - 35	Describes operations with average delays. The influence of congestion becomes more noticeable
E	>35 - 50	Describes operations with higher average delays
F	> 50	LOS F exists where there are insufficient gaps to allow vehicles to enter the traffic stream of the major crossing street. Large queuing on side streets is common at LOS F

Tabella 06 – LOS relativi ai tempi medi di attesa per intersezioni lineari a raso prive di regolazione semaforica

Da quanto appena esposto appare evidente la significatività del tempo medio di attesa, quale parametro indicativo del livello di servizio dell'intersezione e del suo grado di sicurezza: se il tempo di attesa risulta eccessivamente elevato può accadere che i veicoli in testa alla coda, stanchi di aspettare, decidano di forzare la corrente di verso opposto con conseguente pericolo di incidenti.

4.3 Intersezioni semaforiche

La procedura proposta dall'HCM per determinare il livello di servizio di una intersezione semaforica prevede due tipologie di analisi per le intersezioni semaforiche:

1. Analisi di verifica;
2. Analisi di progetto.

Nell'ambito del nostro studio, però, si è fatto riferimento esclusivamente al primo livello di analisi (quello di verifica): si tratta di una metodologia di indagine che, sfruttando informazioni dettagliate sulla geometria, il traffico (numero di veicoli, distribuzione e composizione) ed il piano semaforico dell'intersezione, consente di calcolare la capacità, il livello di servizio ed altre misure prestazionali, nonché di determinare un unico livello di servizio complessivo dell'intersezione.
Nell' analisi prestazionale di un'intersezione, generalmente, si cerca di minimizzare il numero di gruppi di corsie necessarie a descriverne l'operatività; a tale proposito, per la loro individuazione, si fa riferimento alle seguenti considerazioni:

- una o due corsie specializzate per le svolte a sinistra od a destra possono considerarsi come un singolo gruppo di corsie;
- negli accessi, ove esistono corsie esclusive per le svolte (a destra e/o a sinistra), tutte le altre corsie si considerano come un unico gruppo;
- se, in un accesso a più corsie, ne esiste una condivisa per le svolte a sinistra ed i movimenti diretti, è necessario determinare se esistono condizioni di equilibrio o se il numero delle svolte a sinistra è così elevato da far funzionare la corsia esclusivamente per queste ultime. In questo ultimo caso essa andrebbe a costituire un gruppo di corsie a se stante, in quanto rappresenta una corsia esclusiva per le svolte a sinistra "de facto".

Quando due o più corsie vengono incluse, per gli scopi dell'analisi, in un unico gruppo, tutti i calcoli successivi trattano queste corsie come una singola entità.
Nella tabella 07, si riportano tutti i tipi più frequenti di gruppi di corsie.

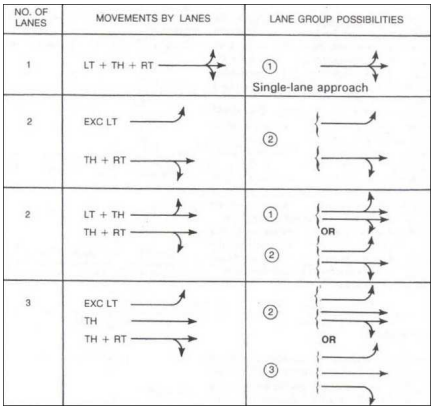


Tabella 07 – Tipici raggruppamenti di corsia utilizzati per l'analisi

Poiché i veicoli di un gruppo di corsie con più di una corsia non si dividono in quote uguali, a volte è necessario correggere i flussi *v*, introducendo un fattore di utilizzo di corsia *UF* che, incrementandone il flusso, tiene conto del più alto utilizzo di una corsia del gruppo. Vale la relazione:

$$v^* = v \cdot UF$$

dove:

- v^* è l'intensità di traffico corretta, in veic/h;
- v è l'intensità di traffico del gruppo di corsie, in veic/h;
- UF è il fattore di utilizzazione di corsia (≥1).

Il fattore UF, usato solo per analizzare la corsia più carica di un gruppo di corsie composto da due o tre corsie di marcia diretta, vale rispettivamente 1,05 e 1,10; esso è uguale a 1, quando, essendo vicini alla saturazione, il flusso si distribuisce equamente.
La procedura per la determinazione del livello di servizio si compone di tre fasi che analizzeremo singolarmente:

- calcolo del flusso di saturazione;
- analisi della capacità;
- determinazione del ritardo di controllo del gruppo.

Il *flusso di saturazione s* è il flusso di veicoli per ora, che un gruppo di corsie può consentire, assumendo che la fase di verde occupi il 100% del tempo del ciclo semaforico, ciò vale a dire:

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

dove:

- g rappresenta il verde effettivo e si ottiene sottraendo dal verde utile (somma del tempo di verde G e del tempo di giallo Y) i perditempo, ovvero i tempi persi alla partenza ed allo sgombero dell'incrocio e la fase di "tutto rosso"; quindi con buona approssimazione esso equivale al tempo di verde G;
- C è la durata del ciclo, espressa in secondi (si definisce con *ciclo semaforico* una qualunque sequenza completa di indicazioni semaforiche, alla fine della quale si ripresenta la medesima configurazione di luci esistente all'inizio della sequenza stessa; una sequenza si dice *completa* se garantisce la via libera almeno una volta a tutte le correnti che impegnano l'intersezione).

Il flusso di saturazione è calcolato per ogni gruppo di corsie, moltiplicando il numero di corsie del gruppo per il flusso di saturazione ideale di una singola corsia (s_0 = 1900 veic/h) e per alcuni coefficienti correttivi (analoghi a quelli visti nelle procedure di calcolo delle strade), che tengono conto delle effettive condizioni geometriche e di traffico dell'intersezione esaminata.
La relazione usata è la seguente:

$$s = N \cdot s_0 \cdot f_W \cdot f_{HV} \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT} \cdot f_{LU}$$

dove:

- N è il numero di corsie del gruppo;
- s_0 è il flusso di saturazione ideale di una corsia = 1900 veic/h;
- f_W è il fattore correttivo per la larghezza delle corsie, che tiene conto degli effetti negativi causati dalla presenza di corsie strette sul flusso di saturazione e consente di incrementare il flusso per corsie ampie, essendo la larghezza standard di una corsia pari a 3,6 m;
- f_{HV} è il fattore correttivo per la presenza di mezzi pesanti, che tiene conto del maggiore spazio occupato da un veicolo pesante e della diversa capacità di manovra rispetto ad un veicolo leggero;
- f_p è il fattore correttivo per manovre di parcamento, che tiene conto degli effetti sul flusso dovuti alla presenza di corsie di parcheggio adiacenti ai gruppi di corsia e delle manovre di parcheggio adiacenti alle corsie, entro 75 m a monte della linea di stop;
- f_{bb} è il fattore correttivo per fermate dei mezzi pubblici, che tiene conto degli effetti sul flusso dei mezzi pubblici che si fermano per far scendere o salire i passeggeri entro 75 m a valle od a monte della linea di stop;

- f_a è il fattore correttivo per l'ubicazione ed il tipo dell'intersezione, che tiene conto dell'inefficienza relativa di intersezioni che presentano le caratteristiche tipiche di una zona di business (strade strette, frequenti manovre di parcheggio, fermate dei veicoli, taxi ed autobus, elevata presenza di pedoni, svolte a piccolo raggio, uso limitato di corsie di svolta esclusive, alta densità di popolazione);
- f_{RT} è il fattore correttivo per le svolte a destra e dipende dal tipo di svolte su corsia esclusiva o condivisa, dal tipo di fasatura e dalla percentuale di veicoli che svoltano a destra in corsie condivise;
- f_{LT} è il fattore correttivo per le svolte a sinistra e dipende dal tipo di svolte su corsie esclusive o condivise, dal tipo di fasatura e dall'intensità di traffico del senso opposto nel caso di svolte a sinistra permesse;
- f_{LU} è il fattore correttivo per l'uso della corsia, che tiene conto della diversa distribuzione del traffico tra le varie corsie di un gruppo con più di una corsia.

I fattori correttivi di svolta tengono conto del fatto che queste manovre vengono eseguite, per diversi motivi (maggiore complessità di esecuzione, minore velocità, conflitti di diversione di traiettoria, …), ad un ritmo inferiore a quello delle dirette, pertanto consumano più verde efficace e riducono la capacità degli accessi.
Ai motivi citati occorre aggiungere una generale maggiore durata di manovra (rispetto a quella di attraversamento diretto), specialmente della svolta a destra, che avviene normalmente su traiettorie a raggio molto stretto ed impone quindi basse velocità di esecuzione.

La *capacità c* per ogni gruppo di corsie è data dal prodotto del flusso di saturazione *s* del gruppo di corsie per il rapporto tra la durata di verde effettivo per quel gruppo e la durata del ciclo (g/C):

$$c = s \cdot \frac{g}{C} \text{ (veic/h)}$$

Il grado di saturazione per ogni gruppo di corsie si calcola direttamente, dividendo il volume corretto relativo al gruppo esaminato per la corrispondente capacità.

Il livello di servizio di un gruppo di corsie viene valutato sulla base del *ritardo di controllo d* del gruppo, espresso, in secondi/veicolo, come la somma di tre termini:

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 + d_3$$

dove:

- d_1 è il ritardo di controllo uniforme, che presuppone arrivi uniformi;
- PF è il fattore di correzione per la progressione del ritardo uniforme, che tiene conto degli effetti della progressione semaforica;
- d_2 è il ritardo incrementale, che tiene conto degli effetti degli arrivi casuali e delle code di sovraccarico e presuppone che non ci sia coda iniziale nel gruppo di corsie all'inizio del periodo di analisi;
- d_3 è il ritardo di coda iniziale, che tiene conto del ritardo di tutti i veicoli nel periodo di analisi dovuto alla coda iniziale.

Le varie componenti di ritardo si ricavano dalle seguenti espressioni:

$$d_1 = \frac{0{,}38 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \cdot \frac{g}{C}\right]}$$

dove:

- C è la durata del ciclo in secondi;
- g e il tempo di verde effettivo per gruppo di corsie in secondi;
- *X* è il grado di saturazione per gruppo di corsie, dato dal rapporto tra il flusso previsto *v* e la capacità del gruppo esaminato *c*.

$$PF = \frac{(1-P)\cdot f_p}{1-\frac{g}{C}}$$

dove:

- *P* è la proporzione dei veicoli che arrivano con il verde;
- f_P è il fattore di correzione supplementare per plotoni che arrivano durante il verde.

$$d_2 = 173X^2 \cdot \left[(X-1)+\sqrt{(X-1)^2+k\frac{X}{c}}\right]$$

dove:

- *c* è la capacità del gruppo di corsie;
- *k* è il fattore correttivo che tiene conto degli effetti del tipo di arrivi.

Una volta stimato il ritardo di controllo per ogni gruppo di corsie, è utile aggregare questi valori per ottenere un ritardo per ogni approccio dell'intersezione ed un ritardo complessivo per l'intera intersezione.
Infatti, il ritardo di controllo su ogni approccio si ottiene calcolando la media pesata dei ritardi dei gruppi di corsie relativi all'approccio esaminato, ovvero i ritardi dei vari gruppi di corsie sono pesati con i rispettivi flussi corretti.
Per cui abbiamo:

$$d_A = \frac{\sum d_i \cdot v_i}{\sum v_i} \text{ (secondi/veicolo)}$$

dove:

- d_i è il ritardo per il gruppo di corsie *i*-esimo, sull'approccio A;
- v_i è il flusso corretto per il gruppo di corsie *i*-esimo.

Il ritardo di controllo per l'intera intersezione si ottiene poi calcolando la media pesata dei ritardi sui vari approcci rispetto ai relativi flussi corretti, ovvero:

$$d_I = \frac{\sum d_{Ai} \cdot v_{Ai}}{\sum v_{Ai}} \text{ (secondi/veicolo)}$$

dove:

- d_{Ai} è il ritardo sull'*i*-esimo approccio;
- v_{Ai} è il flusso corretto per l'*i*-esimo approccio.

Noti quindi i valori del ritardo per ogni gruppo di corsie, per ogni approccio e per l'intera intersezione, per determinare i rispettivi livelli di servizio, è sufficiente consultare la seguente tabella:

Level of Service	Control Delay per Vehicle (sec/veh)	Characteristics
A	<= 10	This occurs when progression is extremely favorable and most vehicles arrive during the green phase. There is little or no delay.
B	>10 - 20	This condition generally occurs with good progression, short cycle length or both. There are short traffic delays.
C	>20 - 35	Individual cycle failures may occur, though many vehicles still pas through without stopping. There are average traffic delays
D	>35 - 55	The influence of congestion becomes more noticeable. Longer delays may result from unfavorable progression, longer cycle lengths, or both. The number of vehicles stopping increases and cycle failures are prevalent. There are long traffic delays.
E	>55 - 80	Individual cycle failures are common occurrences. This LOS is considered to be the limit of acceptable delay by most agencies. There are very long traffic delays.
F	>80	This level is considered to be unacceptable to most drivers and often occurs when vehicles entering the intersection exceed the capacity. There are extreme traffic delays.

Tabella 08 – Livelli di servizio corrispondenti ai valori limite dei ritardi di controllo

4.4 Intersezioni a raso a rotatoria

Il metodo di calcolo della capacità di una rotatoria è stato oggetto di studio in molti Paesi negli ultimi decenni, seguendo le linee indicate da Kimber nel 1980, il quale ricavò la relazione che lega la capacità di un braccio al flusso che percorre l'anello ed alle caratteristiche geometriche della rotatoria attraverso l'analisi statistica, condotta con tecniche di regressione, di un gran numero di dati raccolti su rotatorie in Gran Bretagna, sia di tipo convenzionale che compatto, tutte con priorità sull'anello. Egli dimostrò l'esistenza di una relazione lineare fra la capacità di un braccio e il flusso sull'anello, e pose in evidenza che, fra le caratteristiche geometriche della rotatoria, quelle che hanno influenza di gran lunga maggiore sulla capacità di un braccio sono la larghezza della sua sezione trasversale corrente e quella della sua sezione allargata in corrispondenza della immissione.
I metodi di calcolo della capacità messi a punto nei diversi Paesi, pur essendo riconducibili tutti ad uno stesso schema fondamentale, differiscono in qualche misura fra loro, in parte perché diverse sono le tipologie di rotatoria su cui sono stati misurati i dati sperimentali, ma in misura prevalente per la diversità dei comportamenti degli automobilisti, i quali giocano un ruolo fondamentale nel determinare il modo di funzionare di una rotatoria.
Si riporta qui di seguito il metodo messo a punto in Francia nel 1987 dal SETRA, il quale ha il pregio di fornire, oltre al valore della capacità, anche altri elementi utili per la conoscenza del livello di servizio di una rotatoria. Sia la capacità che i flussi sono misurati in autovetture equivalenti per ora (eph). Per la trasformazione dei flussi di veicoli diversi dalle autovetture in eph si possono adottare i seguenti coefficienti di conversione proposti dalle Norme Svizzere:

Tipo di veicolo	Coefficiente di conversione
1 ciclo o motociclo sull'anello	0.8 autovetture
1 ciclo o motociclo in ingresso	0.2 autovetture
1 veicolo pesante	2.0 autovetture
1 autobus	2.0 autovetture

Tabella 09 – Coefficienti di conversione per la trasformazione dei flussi di veicoli diversi dalle autovetture in eph

A differenza del metodo messo a punto da Kimber, il metodo del SETRA fa intervenire nel calcolo della capacità, oltre al traffico che percorre l'anello in corrispondenza di una immissione, anche il traffico che si allontana all'uscita immediatamente precedente; in questo modo definisce una relazione lineare, invece che fra capacità e flusso che percorre l'anello come nel metodo di Kimber, fra capacità e un *traffico complessivo di disturbo*, nel quale intervengono sia il flusso che percorre l'anello, sia quello in uscita precedentemente definito.
Si consideri la figura 04 dove è rappresentato il particolare di una rotatoria in corrispondenza di un braccio. Sia Q_c il flusso che percorre l'anello all'altezza della immissione, Q_e il flusso entrante e Q_u il flusso uscente. Tutti i flussi sono espressi in autovetture equivalenti per ora (*eph*). Siano ancora: *SEP* la larghezza dell'isola spartitraffico all'estremità del braccio, *ANN* la larghezza dell'anello, *ENT* quella della semicarreggiata del braccio misurata dietro il primo veicolo fermo all'altezza della linea del "dare precedenza". Tutte le lunghezze sono misurate in metri.

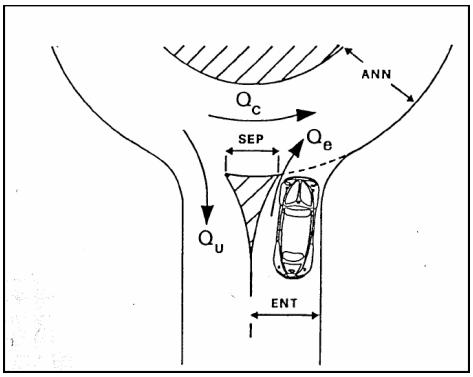


Figura 04 – Caratteristiche geometriche e di traffico di una rotatoria

Sia *K* la capacità del braccio, cioè il minimo valore di Q_e che dà luogo alla presenza permanente di veicoli in attesa di immettersi. Il metodo del SETRA definisce *K* come funzione delle caratteristiche geometriche e di traffico innanzi definite:

$$K = f(Q_c, Q_u, SEP, ANN, ENT) \quad (1)$$

La procedura di calcolo della capacità si compone di tre fasi:

- Si calcola il traffico uscente equivalente Q_u' come funzione di Q_u e di *SEP*:

$$Q'_u = Q_u \cdot \frac{15 - SEP}{15} \text{ (eph)} \quad (2)$$

assumendo $Q_u' = 0$ se $SEP \geq 15$ m

- Si determina il traffico di disturbo Q_d come funzione di Q_c, di Q_u' e di *ANN*:

$$Q_d = \left(Q_c + 2/3Q'_u\right) \cdot \left[1 - 0{,}085\left(ANN - 8\right)\right] \text{ (eph)} \quad (3)$$

- Si calcola quindi la capacità *K* del braccio mediante la relazione:

$$K = \left(1330 - 0{,}7Q_d\right) \cdot \left[1 + 0{,}1\left(ENT - 3{,}5\right)\right] \text{ (eph)} \quad (4)$$

Dalla (4) si vede che, come già posto in evidenza da Kimber, il parametro geometrico fondamentale per il calcolo della capacità è la larghezza *ENT* all'altezza della immissione, ed in particolare lo scarto di *ENT* rispetto ad una larghezza standard di 3,5 m. Tenendo conto di ciò, si usa definire un flusso entrante equivalente Q_e', il quale eguaglia la capacità di un braccio largo 3,5 m quando questa viene raggiunta dal flusso Q_e su un braccio della rotatoria avente la larghezza effettiva *ENT*:

$$Q'_e = \frac{Q_e}{1 + 0{,}1 \cdot \left(ENT - 3{,}5\right)} \text{ (eph)} \quad (5)$$

Il traffico equivalente Q_e' viene utilizzato nel calcolo di alcune caratteristiche di livello di servizio di una rotatoria, come si vedrà più avanti.

Dalle (2) e (3) si rileva che la larghezza *ANN* dell'anello influisce sul valore della capacità attraverso la relazione che esso ha con l'azione di disturbo prodotta dal traffico che percorre l'anello. L'influenza del traffico in uscita sull'azione di disturbo è invece determinata dalla larghezza *SEP* dell'isola spartitraffico: tale influenza è nulla quando *SEP* ≥ 15 m. E' infine da rilevare che la larghezza delle isole spartitraffico e quelle dei bracci all'altezza delle immissioni determinano lo sviluppo della rotatoria e quindi il diametro dell'anello.

Si consideri una rotatoria ad *m* bracci di cui sono state definite le caratteristiche geometriche e sia *M* la sua matrice origine-destinazione, tale che $\rho_{i,j}$ è la frazione del flusso $Q_{e,i}$ entrante dal braccio *i* che esce al braccio *j*. I valori dei flussi $Q_{c,i}$ sull'anello che transitano dinanzi ai vari bracci $i \in [1, m]$ (i bracci sono numerati in sequenza antioraria) sono:

$$Q_{c,1} = Q_{e,m}\left(\rho_{m,2} + ... + \rho_{m,m-1}\right) + Q_{e,m-1}\left(\rho_{m-1,2} + ... + \rho_{m-1,m-2}\right) + ... + Q_{e,3}\rho_{3,2}$$

…… (6)

$$Q_{c,m} = Q_{e,m-1}\left(\rho_{m-1,1} + ... + \rho_{m-1,m-2}\right) + Q_{e,m-2}\left(\rho_{m-2,2} + ... + \rho_{m-2,m-3}\right) + ... + Q_{e,2}\rho_{2,1}$$

I flussi *i u Q* , uscenti dai bracci $i \in [1, m]$ sono:

$$Q_{u,1} = Q_{e,2}\rho_{2,1} + ... + Q_{e,m}\rho_{m,1}$$

…… (7)

$$Q_{u,m} = Q_{e,1}\rho_{1,m} + ... + Q_{e,m-1}\rho_{m-1,m}$$

Sia δ_i quello scalare tale che, moltiplicato per la matrice *M* e quindi per il vettore dei flussi entranti nella rotatoria, dà luogo ad un flusso δ_i $Q_{e,i}$ entrante dal braccio *i* uguale alla capacità K_i del braccio quale si ricava dalla (4). Il valore di δ_i si ricava facilmente dalla (4) se in essa si pone $K = \delta_i Q_{e,i}$ e $Q_d = \delta_i Q_{d,i}$, dove $Q_{d,i}$ si ottiene dalle (2) e (3) ponendo $Q_u = Q_{u,i}$ e $Q_c = Q_{c,i}$, mentre $Q_{u,i}$ e $Q_{c,i}$ si ricavano dalle (6) e (7) in funzione dei flussi entranti e uscenti dagli altri bracci.

Il calcolo di δ_i viene ripetuto per tutti i bracci della rotatoria, e sia δ_j il più piccolo dei valori così ottenuti, relativo al braccio *j*. Risulta $K_j = \delta_j Q_{e,j}$ la capacità semplice della rotatoria, la quale viene raggiunta sul solo braccio *j* quando la matrice *M*, e quindi i flussi in ingresso, sono moltiplicati per δ_j, mentre i flussi in ingresso dagli altri bracci della rotatoria si mantengono al di sotto della capacità.

La capacità totale della rotatoria si calcola determinando i valori dei flussi in ingresso che, distribuendosi fra le varie uscite secondo i coefficienti $\rho_{i,j}$ che si ricavano dalla matrice *M,* determinano il contemporaneo raggiungimento della capacità su tutti i bracci.

Questi flussi in ingresso si ricavano risolvendo il sistema di *m* equazioni lineari nelle *m* incognite $Q_{e,i}$ ottenuto scrivendo la (4) per i singoli bracci, e ponendo in essa $K = Q_{e,i}$ $\forall i \in [1, m]$, mentre Q_d viene espressa in funzione di $Q_{e,j}$ $\forall j \neq i$ utilizzando le (2), (3), (6), (7). La capacità totale *Q* della rotatoria è quindi data da $Q = \sum_{i=1}^{m} Q_{e,i}$.

I valori $Q_{e,i}$ di capacità dei singoli bracci che concorrono a formare la capacità totale vengono posti a base della progettazione di una rotatoria. Poiché però flussi in ingresso di entità uguale ai valori di capacità così definiti determinerebbero la presenza permanente di veicoli in attesa ai bracci, e quindi code di notevole lunghezza, si fa di solito riferimento ad una *capacità pratica* dei singoli bracci data da $K_i = Q_{e,i}$-150, ovvero $K_i = 0{,}8\ Q_{e,i}$.

Le caratteristiche di livello di servizio a cui si fa riferimento nel progetto delle rotatorie sono quelle stesse che vengono considerate nello studio di una qualsiasi intersezione a raso: il tempo medio di attesa dei veicoli alle immissioni ed un adeguato percentile della lunghezza della coda. Questi elementi possono essere calcolati con lo stesso modello teorico utilizzato per le altre intersezioni a raso, basato sul concetto di intervallo critico precedentemente definito, le cui variabili sono il flusso in entrata e quello che percorre l'anello.

Con un modello di questo tipo sono stati ricavati dal SETRA i diagrammi delle figure 05 e 06, nei quali sono riportati rispettivamente i tempi medi di attesa ed il 99° percentile della lunghezza di coda su un braccio di rotatoria in funzione del traffico di disturbo Q_d sull'anello e per diversi valori del flusso entrante equivalente Q_e'. Questi diagrammi rendono il calcolo delle caratteristiche di livello di servizio di una rotatoria estremamente facile.

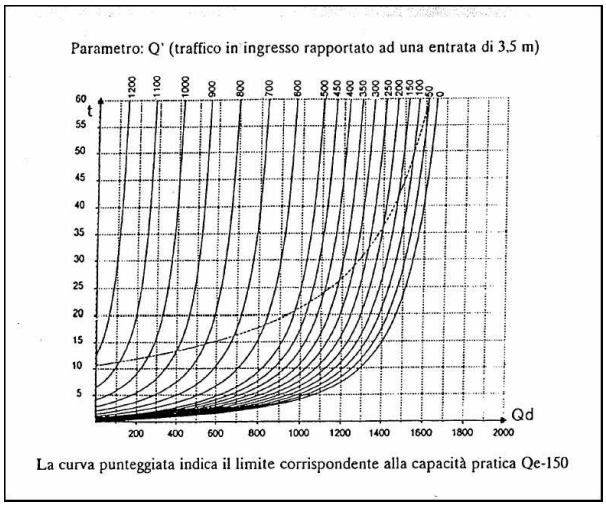


Figura 05 – Tempi medi di attesa su un braccio di rotatoria (in sec)

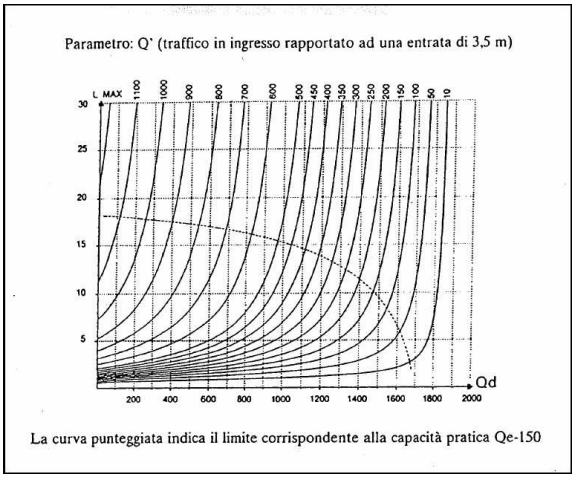


Figura 06 – 99° percentile del numero di veicoli in attesa su un braccio di rotatoria

Infatti servendosi del tempo d'attesa medio, determinato separatamente per ciascun entrata, si può determinare il livello di servizio facendo riferimento alla tabella 10 seguente (estratta dalla Norma Svizzera SNV 640022) in cui sono riportati dei valori limite; il livello di servizio F, non si determina servendosi del tempo d'attesa medio, bensì si ha tale livello quando il flusso in ingresso supera la capacità. Il braccio che presenta il livello di servizio più basso è determinante per l'intera rotatoria.

Livello di servizio	Tempo d'attesa medio
A	≤ 10 s
B	≤ 15 s
C	≤ 25
D	≤ 45
E	> 45
F	flusso in ingresso superiore alla capacità

Tabella 10 – Livelli di servizio corrispondenti ai valori limite della densità veicolare

4.5 Bibliografia

Forrester J.W., 1968, *Principles of Systems*, Cambridge, Mass., Wright-Allen Press, trad.it., 1974, *Principi dei sistemi*, Milano, Etas Kompass.

Smith J.M., 1974, *L'ecologia e i suoi modelli*, Mondadori, Milano

Weisbuc G., *Complex Systems Dynamics*, Redwood City CA, Addison-Wesley.

Prodi G., 1992, *Metodi matematici e statistici per le scienze applicate*, McGraw Hill Libri Italia, Milano

Cole J. P., C. A. M. King, 1968, *Quantitative geography*, Wiley, London.

Cagget P., Chorle J., 1969, *Network Analysis in Geography*, London, Eward Harnold.

Muracchini ., 1967 *Introduzione alla teoria dei grafi*, Torino, Boringhieri.

Beckmann M.J., City hierarchies and the distribution of city size, *Economic Development and Cultural Change* 6, 243-248.

Timbergen, J.,1968, The hierarchy model of the size distribution of centres, *Papers and Proceedings of the Regional Science Association*, 20, 65-68.

Losch, A., 1954, *The Economics of Location*, New Haven, Yale University Press.

Zipf, G.K., 1949, *Human Behaviour and the Principle of Least Effort*, Cambridge Mass., Addison-Wesley.

Christaller W, Il sistema delle località centrali, in Martinotti G. (a cura di), Città e analisi sociologica, Marsilio, Padova

Yan C., 1972, *L'analisi delle interdipenenze strutturali*, Bologna, Il Mulino.

Leontief W., 1967, *Teoria economica delle interdipendenze settoriali*, Milano, Etas Kompas.

Sanglier M., P. M. Allen, 1989, Evolutionary models of urban system: an application to the Belgian provinces, *Environment and Planning A* 21, 477-498.

Lowry, I.S., 1966, Migration and Metropolitan Growth: Two Analytical Models, Chandler Publishing, San Francisco.

Dendrinos D., H. Mullay, 1985, *Urban Evolution. Studies in the Mathematical Ecology of Cities*, Oxford, Oxford University Press.

Dendrinos D., 1992, *The Dynamics of Cities*, London, Routledge.

Alonso W., 1964 "Location Theory", in J. Friedman, W. Alonso, *Regional Development and Planning*, Cambridge Mass., The M.I.T. Press.

Berry B.J.L., F.E. Horton, 1970, *Geographic Perspectives on Urban Systems*, Englewoods Cliffs, NJ, Prentice Hall, (Capitolo 9).

Berry B.J.L., 1964, Cities as Systems Wihitn System of Cities, in J. Friedman, W. Alonso, *Regional Development and Planning*, Cambridge Mass., The M.I.T. Press.

Hutchinson B.G. 1974, *Principles of Urban Transport System Planning*,New York, McGraw-Hill.

Studi di impatto TTA – seet2004 – marz. 2005 – apr. 2005 – lugl. 2005 – Atudio Associato Trasporto traffico Ambiente

studi visionati presso il comune e durante le riunioni di concertazione

Lowry I.S., 1964, *A Model of a Metropolis*, S.Monica CA, Rand Corporation, trad. it., 1972, *Modello di una metropoli*, Napoli, Guida editori.

Wilson A.G., R.J. Bennet. 1985, *Mathematical Methods in Human Geography and Planning*, New York, Wiley.

Traporti territorio ambiente s.r.l. - genova – Pianificazione consulenza ingegneria - centro commerciale alba cn

Diappi Wegner L., Gotti, G., 1980, *Confronto tra strategie di intervento nel settore della casa e dei servizi sociali: un'applicazione dell'analisi multicriteri*, in La Bella A.(a cra di), *Scienze regionali: metodi ed esperienze*, Roma, CNR

Btty M., 1976, *Urban Modelling*, Cambridge, Cambridge University Press

Wilson A.G., 1974, *Urban and Regional Models in Geography and Planning*, NewYork, Wiley.

Lombardo S. T., 1991, *Recenti sviluppi nella modellistica urbana*, in Bertuglia C. S., La Bella A., *I sistemi urbani*, Milano, F. Angeli.

Cecchini A., 1999, *Gli Automi Cellulari: un utile, efficace e semplice strumento per comprendere, descrivere e prevedere le dinamiche del sistema città*, in A. Cecchini (ed.), *Meglio meno, ma meglio automi cellulari e analisi territoriale*, F. Angeli, Milano.

White R., G. Engelen, I. Uljee, 1997, "The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 323-343.

Hagerstrand, T., 1968, *A Monte Carlo Approach to Diffusion*, in B,J,L. Berry, D.F. Marble, *Spatial Analysis*, Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall.

Smboloni F., 2000 "Automa cellulare urbano in un patter 3-D. Studio della dinamica", *Atti della XXI Conferenza Italiana di Scienze Regionali*, Palermo.

Chopard B., A. Dupuis, P. Luthi, 1997, "A cellular automata model fr urban traffic and its application to the city of Geneva", *Proceedings of Traffic and Granular Flow '97*

Della Porta D., 1994, *Appunti sul potere locale. Introduzione al corso di Governo Locale*, Firenze, Facoltà di Scienze Politiche. Università di Firenze.

Bachrach P., M. S. Baratz, 1970, *Power and Poverty. Theory and Practice*, New York, Oxford University Press. Trad. it: 1986, *Le due facce del potere*, Padova, Liviana.

Lind R. S., H. M. Lynd, 1929, *Middletown*, New York, Harcourt Brace.