



Digicorp Ingegneria Srl presenta uno studio riguardante le verifiche funzionali delle intersezioni a raso

L'ANALISI PRESTAZIONALE DELLE INTERSEZIONI STRADALI A RASO

Marco Stefanutti*
Stefano Leone**

La scelta del tipo di intersezione da adottare rappresenta un momento molto importante nelle fasi di pianificazione e di progettazione di un'infrastruttura stradale. Attualmente, in Italia il progetto delle intersezioni stradali è disciplinato dal D.M. 19.04.2006 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali".

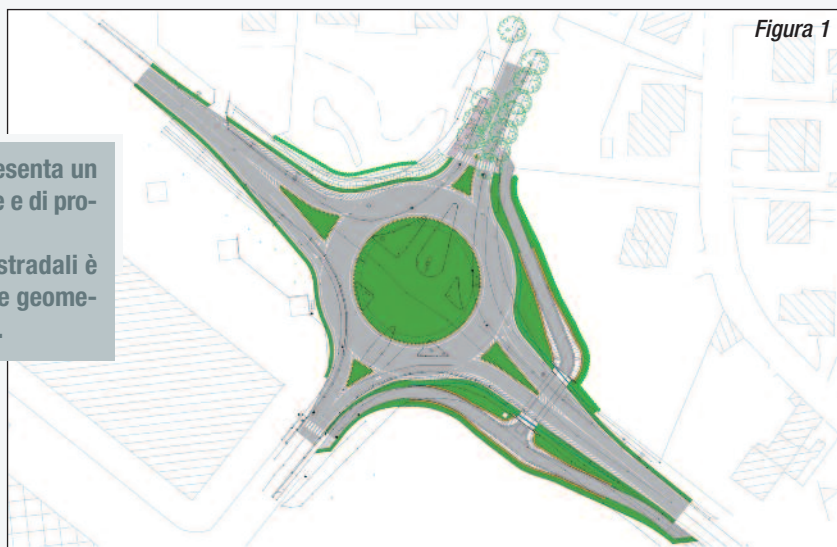


Figura 1

Il Decreto è impostato in modo da definire gli standard progettuali principali delle intersezioni, lasciando una certa libertà al Progettista di scegliere lo schema dell'intersezione e di introdurre o meno elementi geometrici come le isole separatrici, le isole a goccia, le corsie specializzate per la svolta a sinistra, le corsie di uscita, le corsie di immissione, ecc.. Al Progettista viene comunque richiesto di effettuare le verifiche funzionali, in modo da determinare parametri come il tempo medio di attesa, la lunghezza delle code, la capacità delle diverse

manovre, senza vincolare il Progettista stesso all'impiego di uno specifico metodo. La Norma indica, inoltre, le intersezioni ammesse (come livelli minimi) in funzione dei tipi di strada che si incrociano (Figura 2). Trascurando le intersezioni di tipo 1 e 2, ovvero quelle a livelli sfalsati, e le intersezioni non consentite, ossia i casi in cui si collegano strade troppo diverse dal punto di vista gerarchico, si osserva come per le intersezioni di tipo 3, ovvero quelle sistemate a raso, non vengano fornite particolari istruzioni o criteri in grado di orientare il Progettista verso una determinata soluzione. Il presente studio si pone l'obiettivo di valutare mediante un'analisi di tipo prestazionale i casi in cui l'adozione di un dato tipo di intersezione risulti essere più vantaggioso e preferibile rispetto ad un altro, considerando una situazione molto frequente: un'intersezione a raso a quattro bracci tra due strade a singola carreggiata, una di importanza maggiore, l'altra di importanza minore.

Si intende in altri termini valutare le prestazioni offerte da un dato tipo di intersezione in termini di efficienza e di funzionalità, ovvero l'attitudine dell'intersezione a fare defluire determinati volumi di traffico entrante senza dare luogo a eccessivi tempi di attesa per i conducenti. I parametri considerati nel presente studio sono: la capacità, il tempo medio di attesa, e la lunghezza della coda. Per la realizzazione dello studio sono state utilizzate le funzioni grafiche per le intersezioni del software Digicorp Civil Design. Per l'esecuzione delle verifiche funzionali sono state impiegate sia le funzioni del programma CAR di Digicorp Ingegneria, sia una serie di procedure di calcolo messe a punto appositamente.

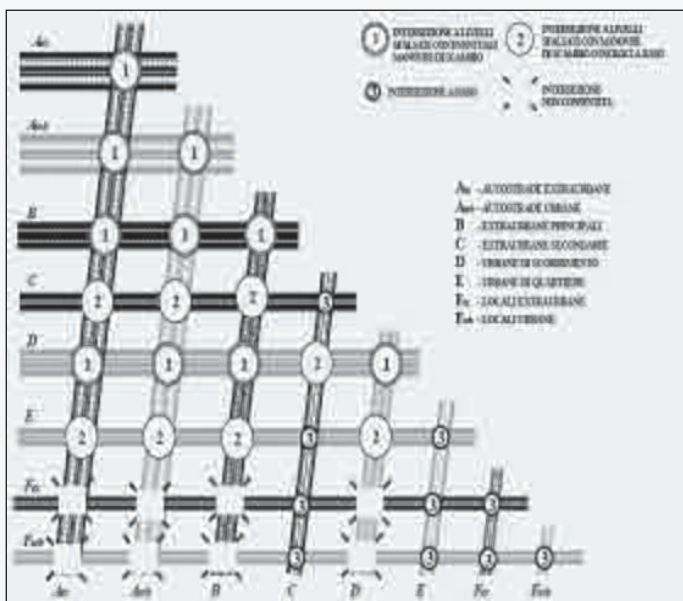


Figura 2 - I tipi di intersezione ammessi in funzione del tipo di strada

Le ipotesi geometriche

Si esamina un'intersezione a raso a quattro bracci con angolo di inclinazione reciproco di 90°.

La strada principale (Rami 2 e 4) viene classificata ai sensi del D.M. 05.11.2001 come "C1" (strada extraurbana secondaria), con piattaforma composta da due corsie larghe 3,75 m e da banchine laterali larghe 1,5 m; la strada secondaria (Rami 1 e 3) viene invece classificata come "F1 extraurbana" (strada extraurbana locale), con una piattaforma composta da due corsie larghe 3,50 m e da banchine laterali larghe 1 m (Figura 3).

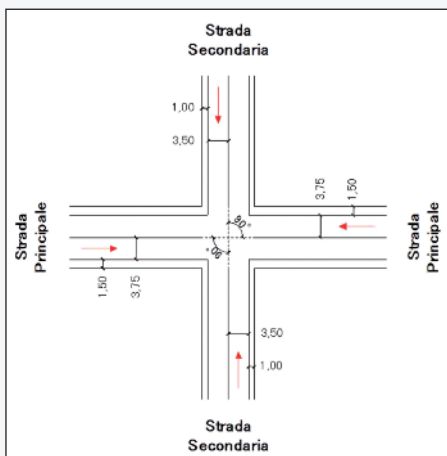


Figura 3 - La geometria delle strade che si incrociano

Le ipotesi sul traffico

Sono state considerate tre diverse intensità del traffico entrante e due schemi di ripartizione dei flussi, in modo da rappresentare condizioni di funzionamento che vanno dalla più favorevole alla più critica.

Le intensità di traffico sono associate a differenti livelli di servizio della strada principale. Come noto, l'Highway Capacity Manual definisce sei livelli di servizio (A-B-C-D-E-F) in modo da descrivere le diverse condizioni di circolazione, partendo dalle situazioni operative migliori (A-B), per arrivare a quelle peggiori (E-F). Per lo studio si considerano flussi entranti nel nodo corrispondenti ai seguenti LOS:

- ◆ LOS A, flussi entranti bassi e quindi condizioni di funzionamento dell'intersezione favorevoli;
- ◆ LOS C, flussi entranti medi; si tratta del livello di servizio che deve essere garantito nelle strade extraurbane secondarie e locali (tipi C e F) secondo quanto stabilito dal D.M. 05.11.2001;
- ◆ LOS E, flussi elevati, prossimi alla capacità, e quindi condizioni di funzionamento dell'intersezione sfavorevoli.

I flussi associati (SF_i) ai diversi LOS sono stati calcolati con la formula dell'HCM:

$$SF_i = 2800 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)_i \cdot f_d \cdot f_w \cdot f_{HV} \quad (1)$$

dove:

$(v/c)_i$ = il rapporto tra il flusso veicolare e la capacità ideale relativo al LOS *i*;

f_d = il fattore relativo alla distribuzione direzionale del traffico;

f_w = il fattore relativo alla larghezza di corsie e banchine;

f_{HV} = il fattore relativo alla presenza di veicoli pesanti.

Calcolato il flusso sulla strada principale associato ai LOS A, C, E, si ipotizza che un flusso pari alla metà dello stesso circoli sulla strada secondaria. Si ritiene in tal modo di rappresentare una situazione frequente nella realtà. Si ottengono così i flussi veicolari entranti (Q_e) ri-

portati in Tabella 1.

Inoltre vengono considerate due differenti modalità di ripartizione delle manovre sulla strada principale (Tabella 2): nella prima le manovre di svolta a destra e a sinistra sono presenti in ugual percentuale (caso 1); nella seconda le svolte a sinistra sono prevalenti (caso 2). Per semplicità, non si introducono differenze nelle percentuali relative alle svolte dalle strade secondarie, ipotizzando quindi una uguale percentuale di veicoli in svolta a sinistra, in attraversamento e in svolta a destra.

Le due diverse distribuzioni di traffico vengono utilizzate per definire le rispettive matrici di origine-destinazione (M) e di distribuzione (N) necessarie ad assegnare a ciascun ramo il corrispondente flusso veicolare (LT = svolta a sinistra, TH = attraversamento, RT = svolta a destra).

Le intersezioni regolate da "stop" o "dare precedenza"

Sono stati considerati i seguenti tipi di intersezione a raso:

- ◆ intersezione lineare a raso di tipo canalizzato (tipo a), caratterizzata dalla presenza sulla strada principale di due corsie centrali di accumulo per la svolta a sinistra e due corsie di uscita ad ago per la svolta a destra sulla strada secondaria; sono presenti isole centrali a goccia e isole separatrici triangolari (Figura 4);
- ◆ intersezione lineare a raso con isole a goccia (tipo b), un'intersezione priva di corsie specializzate sulla strada principale, con isole centrali a goccia e isole separatrici triangolari sulla strada secondaria (Figura 5);
- ◆ intersezione lineare a raso senza isole a goccia (tipo c), caratterizzata dalla totale assenza di corsie specializzate sulla strada principale e di isole a goccia e di isole direzionali sulla strada secondaria (Figura 6).

LOS	A	C	E
Ramo	Q _e (av/h)	Q _e (av/h)	Q _e (av/h)
1	75	225	575
2	150	450	1.150
3	75	225	575
4	150	450	1.150
Totale	450	1.350	3.450

Tabella 1 - I flussi veicolari entranti

Manovra	Rami 2 e 4	Rami 1 e 3
Caso 1		
LT	15%	33,30%
TH	70%	33,30%
RT	15%	33,30%
Caso 2		
LT	35%	33,30%
TH	50%	33,30%
RT	15%	33,30%

Tabella 2 - La distribuzione dei flussi di traffico

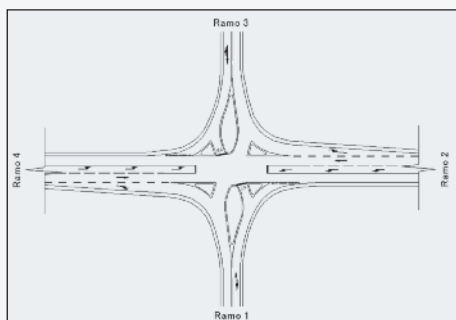


Figura 4 - L'intersezione di tipo a

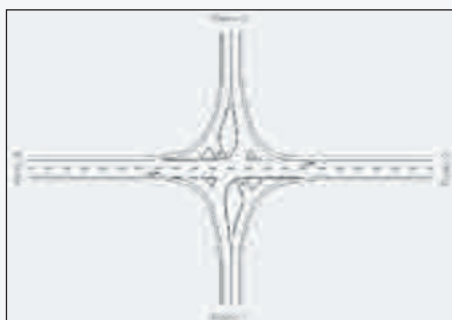


Figura 5 - L'intersezione di tipo b

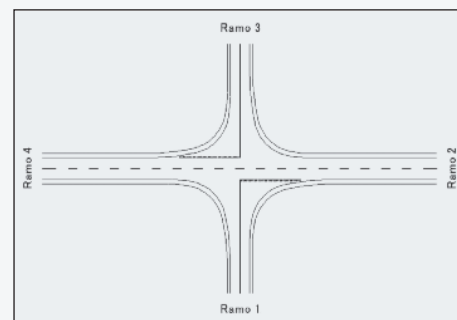


Figura 6 - L'intersezione di tipo c

Il calcolo dei principali parametri di tipo prestazionale per le intersezioni regolate da segnale di stop o di dare precedenza viene effettuato riferendosi alla metodica dell'Highway Capacity Manual che, basandosi sulla geometria dell'intersezione e sull'intensità dei flussi veicolari, consente di valutare la capacità potenziale delle singole manovre ($c_{p,x}$). La capacità potenziale viene modificata per tener conto delle interferenze tra veicoli e della presenza di corsie di tipo promiscuo, in modo da ottenere la reale capacità di manovra delle singole correnti ($c_{m,x}$). Si possono così valutare nell'ordine:

- ◆ il 95° percentile della distribuzione della lunghezza delle code per ciascuna delle manovre x presenti ($Q_{95,x}$):

$$Q_{95,x} = 900 \cdot T \cdot \left[\frac{Q_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \cdot \left(\frac{Q_x}{c_{m,x}} \right)}{150 \cdot T}} \right] \cdot \left(\frac{c_{m,x}}{3600} \right) \quad (2)$$

- ◆ il tempo medio di attesa d associato a ciascuna manovra:

$$d_x = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900 \cdot T \cdot \left[\frac{Q_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \cdot \left(\frac{Q_x}{c_{m,x}} \right)}{450 \cdot T}} \right] + 5 \quad (3)$$

dove:

T = il periodo di analisi [h];

Q_x = il flusso veicolare relativo alla manovra x [av/h];

$c_{m,x}$ = la capacità di manovra per la corrente x [av/h];

d_x = il tempo medio di attesa relativo alla manovra x [s].

I valori del tempo medio di attesa ottenuti si confrontano con i valori corrispondenti ai livelli di servizio previsti dall'HCM per le intersezioni a raso (Tabella 3).

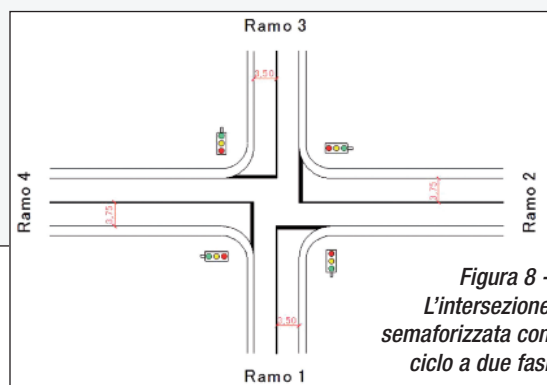
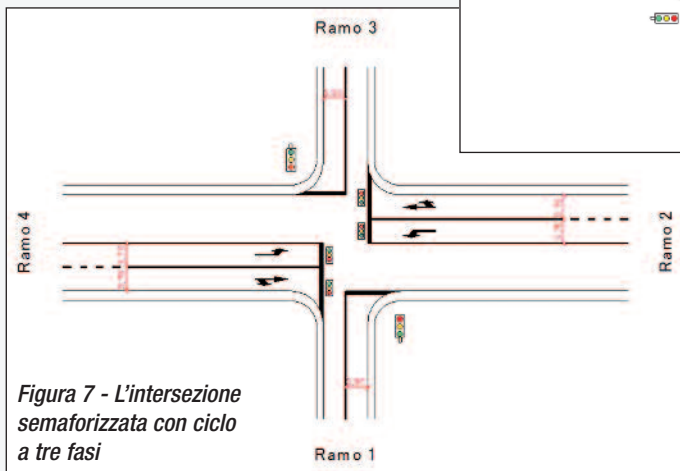
LOS	A	B	C	D	E	F
d [s/av]	≤ 10	10÷15	15÷25	25÷35	35÷50	> 50

Tabella 3 - I livelli di servizio previsti dall'HCM per le intersezioni a raso

Le intersezioni regolate da impianto semaforico

Sono state considerate due soluzioni che si differenziano per il numero di fasi presenti all'interno del ciclo semaforico:

- ◆ intersezione con ciclo a tre fasi, caratterizzata dalla presenza sulla strada principale di corsie promiscue per le manovre di attraversamento e di svolta



a destra e di corsie specializzate per la svolta a sinistra, mentre sulla strada secondaria ci sono solo corsie di tipo promiscuo (Figura 7). E' previsto il seguente piano di fasatura:

- ◆ Fase 1 = verde assegnato alle sole manovre di attraversamento e di svolta a destra dalla strada principale;
- ◆ Fase 2 = verde assegnato alle sole manovre di svolta a sinistra dalla strada principale;
- ◆ Fase 3 = verde assegnato a tutte le manovre presenti sulla strada secondaria.
- ◆ intersezione con ciclo a due fasi, caratterizzata dalla presenza sia sulla strada principale che su quella secondaria di sole corsie di tipo promiscuo (Figura 8). A questa seconda soluzione è stato associato il seguente piano di fasatura:
 - ◆ Fase 1 = verde assegnato a tutte le manovre presenti sulla strada principale;
 - ◆ Fase 2 = verde assegnato a tutte le manovre presenti sulla strada secondaria.

Per semplicità l'analisi condotta riguarda intersezioni semaforizzate con impianto a ciclo fisso, ovvero caratterizzate da una durata costante del ciclo semaforico. Si è fatto riferimento alle indicazioni contenute in due diversi documenti tecnici:

- ◆ Norme C.N.R. N. 150/1992 "Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane";
 - ◆ Transportation Research Board (2000) - "Highway Capacity Manual".
- Le prime vengono utilizzate per la progettazione e la verifica del piano semaforico, le seconde per l'analisi prestazionale dell'intersezione semaforizzata.

Con la procedura delle Norme C.N.R. si sommano gli indici di carico (Y_i) associati a ciascuna delle i fasi considerate e i relativi perditempo totali (L_i) e si perviene alla stima dell'indice di carico (Y) e del perditempo totale (L) dell'intersezione, grazie ai quali si può ricavare il ciclo semaforico teorico (equazione 4)

$$C_t = L / (1 - Y) \quad (4)$$

e la durata dei tempi di verde e di rosso.

Con la metodica dell'HCM si determina il flusso di saturazione (s_j)

associato al gruppo di corsie in esame tenendo conto della geometria dell'intersezione (numero di corsie per ogni gruppo, relativa larghezza, pendenza ed eventuale presenza di corsie di sosta), della percentuale di mezzi pesanti e del tipo di area in cui l'intersezione si trova. Infine, si procede alla valutazione di due fattori che quantificano la riduzione di capacità di ciascun gruppo di corsie dovuta alla presenza di svolte a sinistra e a destra e al tipo di fase corrispondente (protetta o permessa).

Nota il flusso di saturazione, viene calcolata per ciascun gruppo di corsie la relativa capacità:

$$C_j = s_j \left(\frac{g_j}{C} \right) \quad (5)$$

dove:

s_j = flusso di saturazione del j-esimo gruppo [av/h];

g_j = verde effettivo assegnato al j-esimo gruppo [s];

C = il ciclo semaforico ottimale [s].



E' quindi possibile procedere al calcolo del tempo medio di attesa (d) per un dato gruppo di corsie:

$$d = \frac{0,5 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \min(1, X) \cdot \left(\frac{g}{C}\right)} \cdot PF + 900 \cdot T \cdot \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{4 \cdot X}{c \cdot T}} \right] + d_3 \quad (6)$$

dove:

C = il ciclo semaforico ottimale [s];

g = il verde effettivo assegnato al gruppo di corsie considerato [s];

X = il rapporto di saturazione per il gruppo di corsie considerato (Q_i/c_i);

PF = un fattore correttivo per il ritardo uniforme;

T = il periodo di analisi [h];

c = la capacità del gruppo di corsie [av/h];

d_3 = il ritardo dovuto alla presenza di code all'inizio del periodo di analisi [s/av].

Si possono quindi confrontare i tempi medi di attesa ottenuti con quelli associati ai livelli di servizio previsti dall'HCM per le intersezioni semaforizzate (Tabella 4).

LOS	A	B	C	D	E	F
d [s/av]	≤ 10	10÷20	20÷35	35÷55	55÷80	> 80

Tabella 4 - Livelli di servizio previsti dall'HCM per le intersezioni semaforizzate

Le intersezioni di tipo rotatorio

Sono state considerate due categorie di rotatorie:

- ♦ rotatorie con ingressi a singolo attestamento (Figura 9);
- ♦ rotatorie con ingressi a doppio attestamento lungo la strada principale (Figura 10).

In entrambi i casi le rotatorie sono dimensionate secondo quanto previsto dal D.M. 19.04.2006; le corsie di entrata sono pertanto larghe 3,5 m o 6 m rispettivamente nei casi di attestamento singolo o di attestamento doppio; le uscite, sempre organizzate con una singola corsia, sono larghe 4 o 4,5 m, in funzione del diametro esterno; l'anello è largo 6-7 m, in relazione al diametro esterno.

Sono state analizzate rotatorie aventi i seguenti valori del diametro esterno: D = 20-25-30-35-40-50-60-70-80 m.

Per il calcolo della capacità delle intersezioni a rotatoria sono stati impiegati sei metodi diversi messi a punto in alcuni Paesi europei e negli Stati Uniti, al fine di valutare sia eventuali differenze tra i metodi analizzati, sia l'influenza di specifici elementi geometrici sulla capacità. I metodi che sono stati presi in considerazione sono SETRA (Francia), Kimber (Gran Bretagna), Bovy (Svizzera), Brilon-Wu-Bondzio (Germania), HCM (Usa), CETUR (Francia).

A partire dalla matrice di distribuzione N vengono ricavati i flussi veicolari uscenti e circolanti sull'anello di fronte a ciascun braccio, in modo tale da ottenere con ciascuno dei sei metodi considerati i seguenti parametri per ogni ramo: capacità di braccio, capacità semplice, riserva di capacità, capacità totale, grado di saturazione, tempo medio di attesa, lunghezza media della coda, 95° percentile della distribuzione delle lunghezze della coda. Le relazioni utilizzate per il calcolo del tempo medio di attesa e della lunghezza della coda, nonché i valori dei LOS considerati per analizzare la qualità della circolazione all'interno delle rotatorie, sono gli stessi impiegati per le intersezioni a semplice precedenza (formule dell'HCM). Per ciascun tipo di rotatoria è quindi possibile valutare la dipendenza tra i sopra citati parametri prestazionali ed i seguenti parametri geometrici e di flusso:

- ♦ ENT [m] = larghezza della corsia di entrata valutata a 5 m dalla linea del dare precedenza;
- ♦ SEP [m] = larghezza dell'isola separatrice;
- ♦ ANN [m] = larghezza dell'anello;
- ♦ D [m] = diametro esterno;
- ♦ V [m] = larghezza della corsia di entrata prima della svasatura;
- ♦ E [m] = larghezza dell'entrata sulla linea del dare precedenza;
- ♦ L' [m] = lunghezza media della svasatura;
- ♦ Re [m] = raggio di entrata;
- ♦ Φ [°] = angolo di ingresso;
- ♦ b [m] = distanza tra punti di conflitto (entrata/uscita);
- ♦ R [m] = raggio esterno;
- ♦ Qu [av/h] = flusso uscente dal braccio;
- ♦ Qc [av/h] = flusso circolante sull'anello di fronte al braccio.

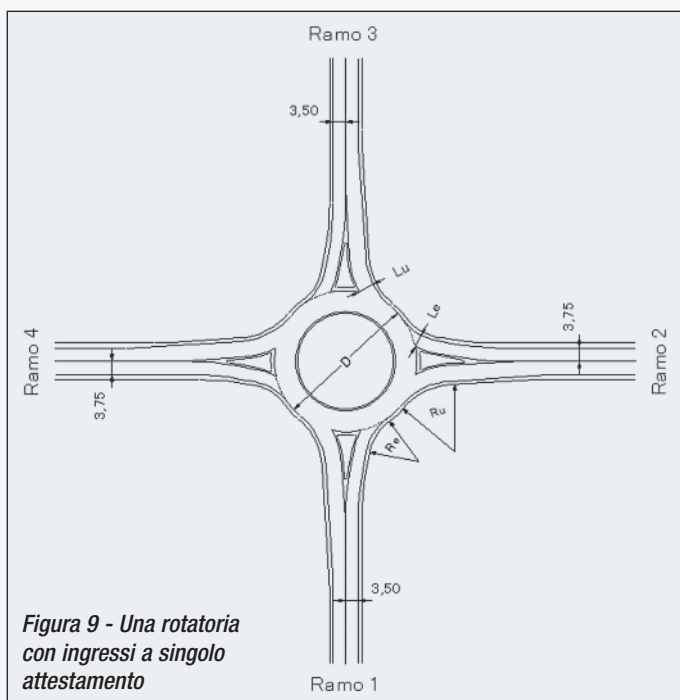


Figura 9 - Una rotatoria con ingressi a singolo attestamento

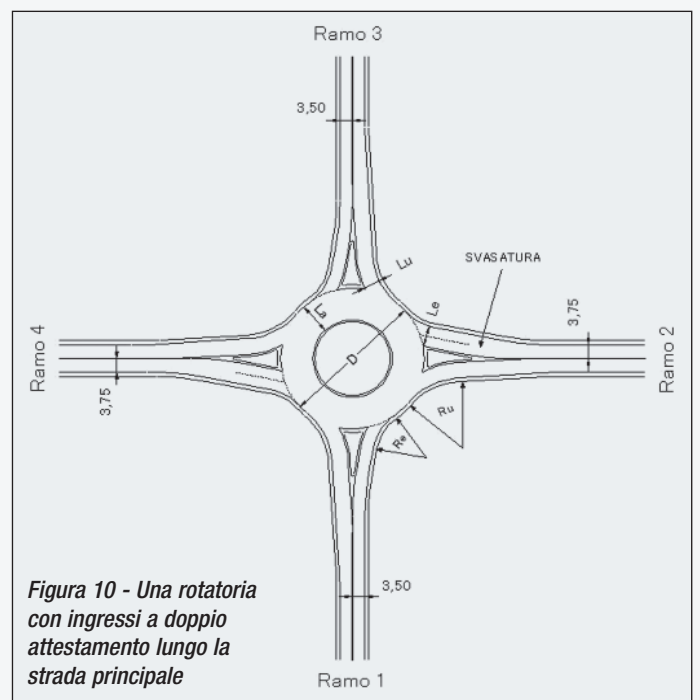


Figura 10 - Una rotatoria con ingressi a doppio attestamento lungo la strada principale



I risultati

Le intersezioni lineari a raso

Le intersezioni regolate da segnale di stop o di dare precedenza si sono dimostrate una valida soluzione progettuale esclusivamente per flussi veicolari bassi (come quelli associati ad un LOS A) o per flussi di media entità (LOS C) limitatamente al caso di bassa percentuale di svolte a sinistra, rivelandosi invece una soluzione decisamente inefficiente per la gestione di flussi veicolari elevati (LOS E).

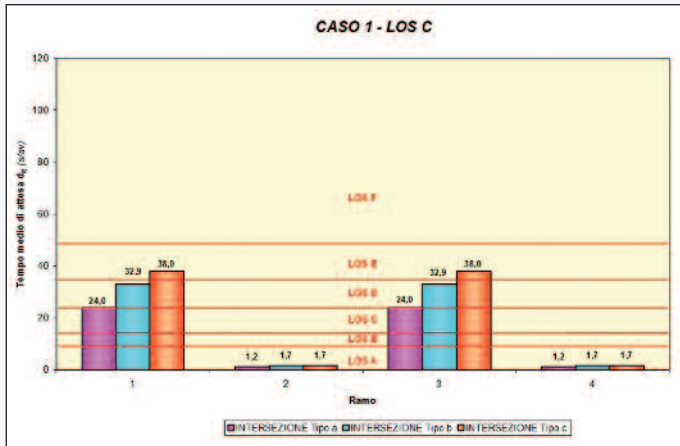


Figura 11 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni lineari a raso nel caso di flussi entranti di media intensità e di bassa percentuale di svolte a sinistra

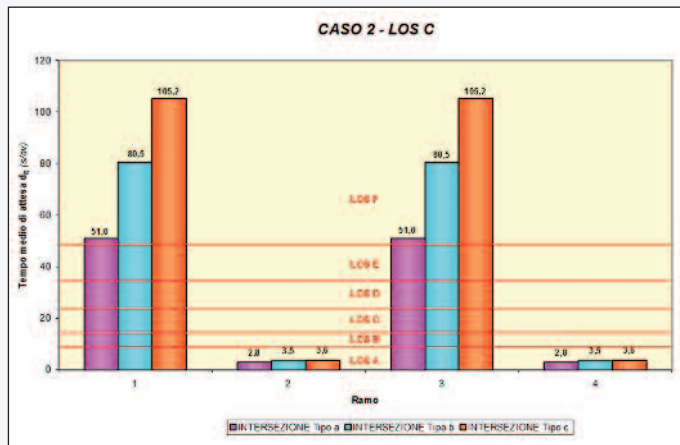


Figura 12 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni lineari a raso nel caso di flussi entranti di media intensità e di alta percentuale di svolte a sinistra

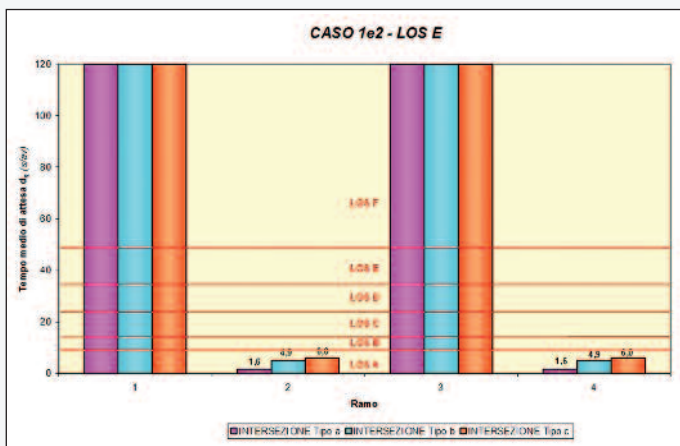


Figura 13 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni lineari a raso nel caso di flussi entranti elevati

Dal punto di vista numerico vale quanto segue:

- ◆ per flussi entranti dal ramo principale fino a 150 av/h, ovvero, per le ipotesi formulate nel presente studio, fino a 450 av/h entranti complessivamente nel nodo, non si riscontra nessuna situazione problematica, ed una intersezione con semplici isole a goccia sulla strada secondaria (tipo b) o di tipo elementare (tipo c) è in grado di garantire ottimi livelli di servizio;
- ◆ per flussi entranti dal ramo principale fino a 450 av/h, per un totale di circa 1.350 av/h per l'intero nodo, se la percentuale di svolte a sinistra dalla strada principale rimane inferiore al 15%, un'intersezione a raso regolata con segnali di stop o di dare precedenza è ancora in grado di garantire un discreto livello di servizio, ma solo in presenza di corsie specializzate sulla strada principale (tipo a); in assenza di esse il livello di servizio dell'intersezione si abbassa (si passa da LOS C, a norma, a LOS E). L'aumento della percentuale di svolte a sinistra dalla strada principale a valori maggiori o uguali al 35% riduce considerevolmente il livello di servizio dell'intersezione, con tempi medi di attesa che superano il minuto (Figure 11 e 12); ciò rende controindicato per il campo di valori di flusso sopra precisato l'impiego di intersezioni lineari a raso regolate soltanto con stop e dare precedenza;
- ◆ per flussi entranti dalla strada principale superiori ai 1.000 av/h, per un totale di oltre 3.000 av/h per l'intero nodo, l'intersezione regolata con la semplice precedenza entra in crisi, qualsiasi sia la tipologia adottata (Figura 13).

Le intersezioni semaforizzate

Le intersezioni regolate da impianto semaforico rappresentano un'ottima soluzione progettuale per la gestione di flussi veicolari entranti di bassa e media entità (LOS A e LOS C), dimostrandosi invece inadeguate per la gestione di flussi veicolari entranti elevati (LOS E); in tale situazione infatti su tutti i rami si rilevano tempi di attesa inaccettabili per gli utenti.

Dal punto di vista numerico vale quanto segue:

- ◆ per flussi entranti bassi (inferiori a 150 av/h per la strada principale e a 450 av/h per il nodo) qualsiasi tipo di intersezione semaforizzata è in grado di assicurare ottimi livelli prestazionali; risulta indubbiamente conveniente adottare una soluzione a due fasi, in quanto sono minori i tempi di attesa.
- ◆ per flussi entranti medi (attorno a 450 av/h per la strada principale e a 1.350 av/h per il nodo) il ciclo a tre fasi fornisce una capacità maggiore, ma con tempi di attesa superiori rispetto a quelli del

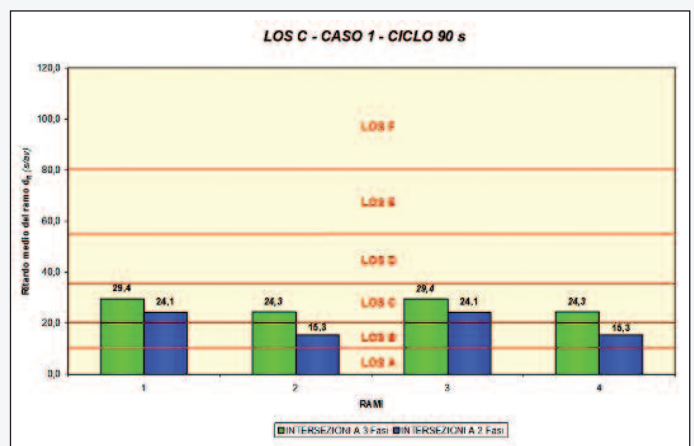


Figura 14 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni semaforizzate nel caso di flussi entranti di media intensità e di bassa percentuale di svolte a sinistra

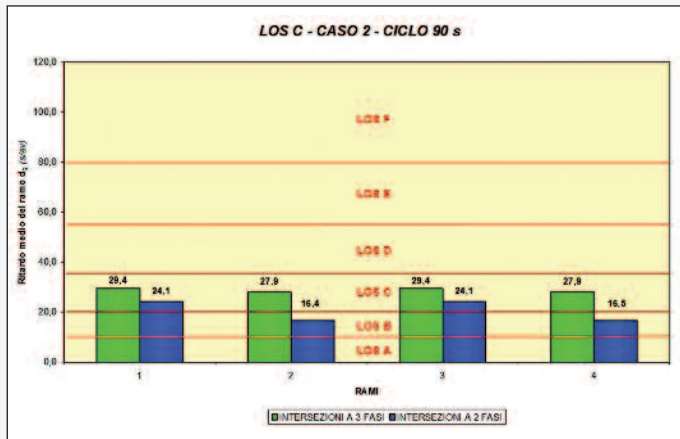


Figura 15 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni semaforizzate nel caso di flussi entranti di media intensità e di alta percentuale di svolte a sinistra

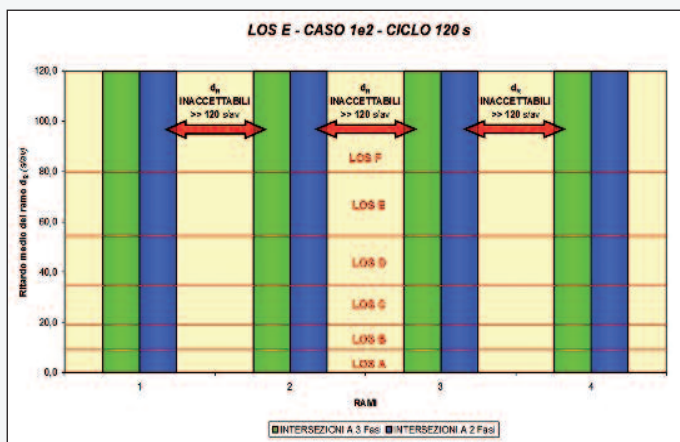


Figura 16 - I tempi medi di attesa nelle intersezioni semaforizzate nel caso di flussi entranti elevati

ciclo a due fasi. L'incremento di svolte a sinistra non dà luogo a variazioni significative dei risultati (Figure 14 e 15).

- ◆ per flussi entranti elevati (superiori a 1.000 av/h per la strada principale e a 3.000 av/h per il nodo) entrambe le soluzioni semaforizzate si dimostrano inadeguate alla gestione del traffico veicolare, portando a tempi di attesa su tutti e quattro i rami superiori ai 120 s e di conseguenza tali da generare fenomeni di congestione del nodo (LOS F, Figura 16).

Le rotatorie

Lo studio condotto sulle intersezioni di tipo rotatorio ha permesso di giungere ai seguenti risultati:

- ◆ i sei metodi di studio della capacità forniscono, a parità di condizioni, valori molto diversi, tali da non rendere possibile senza un'ampia sperimentazione in situ alcun giudizio in merito alla validità di un metodo piuttosto che di un'altro. Si è tuttavia osservato che i metodi di Kimber e del SETRA, rispetto agli altri criteri, tengono conto di un maggior numero di parametri geometrici e restituiscono valori di capacità generalmente inferiori. I due metodi si dimostrano quindi più completi e al tempo stesso più cautelativi. Appare pertanto ragionevole, in mancanza di un apposito metodo sviluppato in Italia, utilizzare uno dei due metodi indicati o preferibilmente entrambi per condurre studi prestazionali sulle intersezioni a rotatoria.
- ◆ il diametro D relativo alla circonferenza esterna della rotatoria, ovvero l'elemento che principalmente influisce sulle dimensioni e sui costi finali di questo tipo di intersezione, incide poco sulle variazioni di

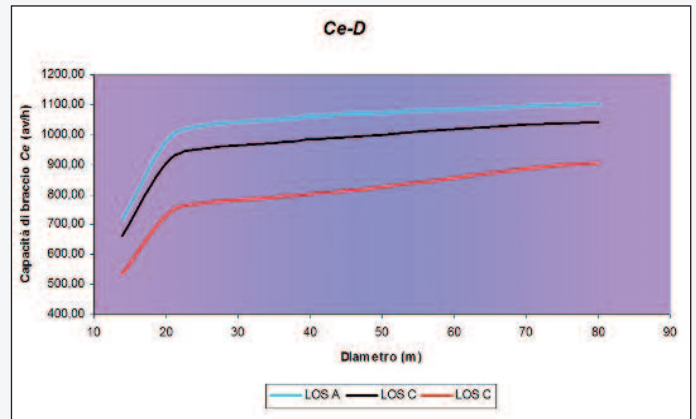


Figura 17 - La capacità di braccio in funzione del diametro esterno della rotatoria

capacità dei singoli bracci e dell'intersezione più in generale (Figura 17). Per tale motivo non ha significato realizzare rotatorie di grande diametro quando non sono previsti flussi veicolari entranti rilevanti.

- ◆ per quanto riguarda la larghezza dell'anello è noto che nelle rotatorie con entrate a singolo attestamento il D.M. 19.04.2006 prevede una riduzione della sua larghezza al crescere del diametro. L'analisi effettuata ha messo in evidenza come i vantaggi in termini di capacità che si possono ottenere mediante un allargamento della corona giratoria risultino di scarso interesse nel caso di flussi veicolari medi e bassi, mentre sono consistenti in presenza di flussi elevati. Per questo motivo la scelta fatta dalla Norma italiana di limitare la larghezza dell'anello su grandi diametri appare valida nel caso di flussi medio-bassi, ma inadeguata nel caso di flussi elevati, in presenza dei quali un opportuno ampliamento della sezione dell'anello può fornire benefici incrementi di capacità, che sui rami principali possono raggiungere valori del 20% e del 30%, rispettivamente nel caso di limitate e consistenti percentuali di svolte a sinistra.
- ◆ la realizzazione di una graduale svasatura sui rami di ingresso (Figura 18), ovvero di un allargamento della sezione di entrata, rappresenta la soluzione in grado di produrre i più interessanti vantaggi per le capacità delle corsie di entrata; è sufficiente un incremento di larghezza di soli 0,5 m rispetto ai valori previsti dalle Norme italiane per dare luogo a incrementi capacitivi dell'ordine del 15-20% indipendentemente dalle condizioni di traffico.
- ◆ l'intersezione di tipo rotatorio si è infine dimostrata come la soluzione progettuale indubbiamente più adatta per gestire flussi veicolari medio-alti, risultando l'unica intersezione a raso in grado, seppur con dimensioni rilevanti ($D = 70-80$ m), di distribuire flussi veicolari elevati senza dare luogo a fenomeni di congestione.

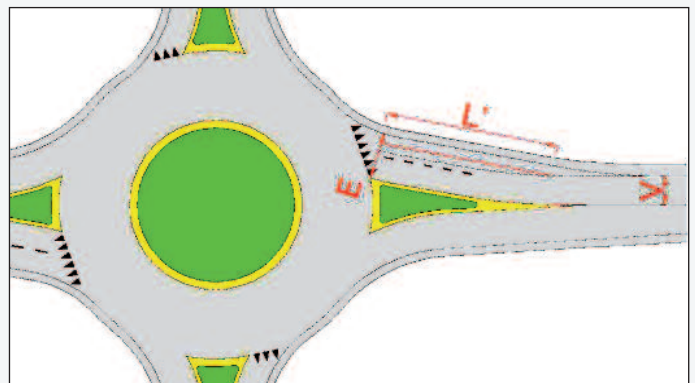


Figura 18 - La svasatura del ramo di ingresso



Conclusioni

L'analisi prestazionale di vari tipi di intersezione a raso a quattro bracci, effettuata in termini di capacità, tempi medi di attesa e lunghezza delle code, ha permesso di ottenere informazioni che possono orientare il Progettista nella scelta della soluzione da adottare.

In particolare si è trovato che:

- 1) per flussi veicolari entranti nel nodo bassi (complessivamente inferiori a 450 av/h) dal punto di vista funzionale tutte le tipologie considerate sono in grado di fare defluire il traffico entrante con tempi di attesa minimi. In tale caso risulta conveniente l'impiego delle seguenti soluzioni progettuali:
 - ◆ intersezioni lineari a raso con isole a goccia e isole separatrici sui rami secondari (tipo b);
 - ◆ intersezioni semaforizzate con suddivisione del ciclo semaforico in due fasi;
 - ◆ intersezioni a rotatoria con unica corsia su tutti gli ingressi e con piccolo diametro ($D = 14 \div 25$ m, mini-rotatorie).
- 2) per flussi veicolari entranti nel nodo medi (attorno a 1.350 av/h) è necessario rivolgere l'attenzione verso le seguenti soluzioni progettuali:
 - ◆ intersezioni lineari a raso di tipo canalizzato (tipo a), ma solo in presenza di limitate percentuali di svolte a sinistra (dell'ordine del 15%);
 - ◆ intersezioni di tipo semaforizzato con ciclo semaforico ripartito su tre fasi;
 - ◆ intersezioni a rotatoria di dimensioni piccole e medie come le mini-rotatorie (ma con $D > 20$ m) e le rotatorie compatte ($D = 25 \div 40$ m) con attestamenti singoli o doppi sui rami principali.
- 3) per flussi veicolari entranti nel nodo elevati (superiori a 3.000 av/h) le intersezioni lineari a raso, le intersezioni semaforizzate, e le rotatorie con ingressi a singolo attestamento si dimostrano inadeguate. La scelta progettuale deve orientarsi verso le intersezioni a rotatoria con entrate a doppia corsia sui due rami principali e con diametri esterni molto grandi (dell'ordine di 60 m nel caso di bassa percentuale di svolte a sinistra e di 80 m nel caso di una alta percentuale di svolte a sinistra).

Nel caso in cui i tempi medi di attesa o la lunghezza delle code risultino eccessivi, occorre inevitabilmente ricorrere alle intersezioni a livelli sfalsati. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1]. S. Canale, S. Leonardi, N. Distefano, G. Pappalardo - "Progettare le intersezioni", EPC Libri (Roma), Ottobre 2006.
- [2]. S. Canale, S. Leonardi, N. Distefano, G. Pappalardo - "Progettare le rotatorie", EPC Libri (Roma), Ottobre 2006.
- [3]. F. Annunziata, E. Cecere, M. Coni, F. Maltinti, F. Pinna, S. Portas - "Progettazione stradale. Dalla ricerca al disegno delle strade", Dario Flaccovio Editore (PA), 2007.
- [4]. S. Rinelli - "Intersezioni stradali semaforizzate", UTET (TO), 2000.
- [5]. C.N.R. - B.U. n° 150 del 15-12-1992 - "Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane".
- [6]. D.M. n° 6.792 del 05.11.2001 - "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".
- [7]. C.N.R. - Rapporto di sintesi: "Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali", 10.09.2001.
- [8]. D.M. 19.04.2006 - "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali".
- [9]. Transportation Research Board - "Highway Capacity Manual", Special Report 209, Washington, D.C., 2000.
- [10]. Federal Highway Administration - "Roundabouts - An informational guide - FHWA-RD-00-067", Washington, D.C., 2000.
- [11]. SETRA - "Aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales", Carrefours Plans, Paris, 1988.
- [12]. CETUR - "Conception des Carrefours à sens Giratoire Implantés en Milieu Urbain", Paris, 1988.
- [13]. P. Bovy, K. Dietrich, A. Harmann et al. - "Guide Suisse des giratoires", FVS/FSS-EPFL, Losanna, 1991.
- [14]. S. Leone - "Analisi prestazionale delle intersezioni a raso", Tesi di Laurea, Udine, 2008.

* *Ingegnere e Progettista stradale della Digicorp Ingegneria Srl e Professore a Contratto dell'Università di Udine*

** *Ingegnere e Progettista stradale della Digicorp Ingegneria Srl*