

T.Esposito – R.Mauro – M.Corradini

**LE INTERSEZIONI STRADALI
E LE NUOVE NORME FUNZIONALI E GEOMETRICHE
PER LA COSTRUZIONE DELLE INTERSEZIONI**

Luglio 2007

La presente monografia costituisce l'aggiornamento del Cap.11 del testo T.Esposito, R.Mauro, "Fondamenti di Infrastrutture Viarie – Vol.1 – La geometria stradale", Hevelius Edizioni, 2^a edizione, 2003 a seguito della emanazione delle "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni", D.M. 19 aprile 2006, G.U. n° 170 del 24/07/2006.

LE INTERSEZIONI STRADALI E LE NUOVE NORME FUNZIONALI E GEOMETRICHE PER LA COSTRUZIONE DELLE INTERSEZIONI

T.Esposito – R.Mauro – M.Corradini

1. Premessa

Si definisce intersezione stradale (nodo) l'area individuata da tre o più tronchi stradali (archi) che convergono in uno stesso punto, nonché dai dispositivi e dagli apprestamenti atti a consentire ed agevolare le manovre per il passaggio da un tronco all'altro.

Le intersezioni, qualunque sia la loro localizzazione territoriale, costituiscono punti critici del sistema viario per effetto delle interferenze che in esse si instaurano tra le diverse correnti di traffico.

Si acquisiscono pertanto, nel loro ambito, i problemi legati alla sicurezza (circa un terzo degli incidenti registrati annualmente in Italia si verifica in corrispondenza degli incroci) e quelli relativi alla regolarità ed efficienza della circolazione.

Dalla numerosità dei fattori da cui dipende la configurazione di un incrocio (numero e tipo di strade, entità dei flussi, situazioni locali, ecc.) deriva una ancor più vasta gamma di tipologie e di schemi; risulta pertanto estremamente difficile elaborare una classifica onnicomprensiva delle intersezioni, a meno di non ricorrere a suddivisioni tanto vaste e numerose da rendere pressoché inutile la classifica stessa.

È tuttavia possibile operare alcune suddivisioni per categorie generali con riferimento all'ambito territoriale ed alla tipologia dell'incrocio.

Relativamente all'ambito territoriale si hanno quindi intersezioni extraurbane ed intersezioni urbane. Per le prime elementi caratterizzanti risultano la possibilità di non arrestare tutte - o alcune - correnti di traffico; la velocità delle correnti in transito ed in svolta; la distanza, spesso notevole, fra incroci successivi. Per contro, le intersezioni urbane sono, nella maggior parte dei casi, caratterizzate dalla reciproca breve distanza e dalla presenza di componenti di traffico assenti o trascurabili nella viabilità extraurbana; si aggiungano a ciò tutti i vincoli derivanti dal "costruito" che spesso condizionano del tutto, o quasi, la possibilità di tipologie e geometrie adeguate.

Altro criterio di classifica è quello che suddivide le intersezioni in tre grandi categorie:

- intersezioni a raso (o a livello), suddivise a loro volta in intersezioni lineari e a rotatoria, in cui le strade confluenti risultano complanari con conseguenti interferenze fra le correnti in transito ed in svolta;
- incroci semaforizzati, che sono ancora intersezioni a raso in cui è previsto, però, l'arresto periodico ed alternato delle correnti di traffico. Sono utilizzati quasi esclusivamente in ambito urbano e suburbano;
- intersezioni a livelli sfalsati, in cui la separazione altimetrica tra le correnti in transito si realizza mediante opere di scavalco, mentre la connessione fra le due strade è assicurata da una o più rampe.

In questo capitolo verranno illustrati i criteri generali di scelta ed i dati occorrenti per la progettazione; saranno descritte le principali tipologie di incroci e le metodologie di calcolo di tutti gli elementi geometrici le cui dimensioni derivano da considerazioni cinematiche.

I metodi per valutare alcuni indici prestazionali (tempi medi di attesa, numero medio di veicoli in coda, ecc.) che afferiscono al progetto funzionale delle intersezioni sono illustrati in [4].

2. Criteri di scelta

Il progetto di una nuova strada corrisponde, in generale, all'inserimento di nuovi archi e nodi nella rete viaria esistente. La scelta definitiva di un determinato tracciato individua anche la posizione dei nodi, ovvero la localizzazione della intersezione. Occorre dire, peraltro, che proprio la più opportuna ubicazione degli incroci può comportare modifiche planimetriche e/o altimetriche ad una primitiva scelta di tracciato e concorre, quindi, alla definizione della soluzione ritenuta migliore. Per quanto riguarda il distanziamento tra incroci successivi su strade extraurbane è desiderabile che tale distanza sia dell'ordine di 500 m [12]; in [14] vengono indicate una distanza minima di 250 m e distanze desiderabili funzione della velocità operativa: 600 m per $V_{85} = 60\div 70$ km/h; 900 m per $V_{85} = 80\div 90$ km/h; 1200 m per $V_{85} = 100\div 110$ km/h.

Individuata la localizzazione, la scelta tra le tre categorie fondamentali di intersezioni elencate in premessa discende direttamente dai tipi di strade che convergono nel nodo o, meglio, dalla rete cui appartengono.

Nel Cap.6 di [5] si è già detto (§ 6.1) che ai quattro livelli di rete si associano quattro classi di interconnessioni denominate anch'esse Primaria, Principale, Secondaria e Locale e che per il buon funzionamento della rete globale le connessioni vanno fatte tra strade della medesima rete (connessioni omogenee) o con strade appartenenti a reti gerarchicamente inferiori (connessioni

disomogenee), così come indicato nella Fig.5 del sopra citato Cap.6. Qui si precisa che le connessioni tra strade della medesima rete vanno sempre realizzate, mentre per quelle tra strade di reti diverse, purché ammesse, va esaminata la opportunità e la convenienza economica della loro realizzazione. Queste indicazioni hanno validità nel caso di infrastrutture da progettare. Di fatto, nelle reti esistenti si riscontrano situazioni diverse, quali ad es. connessioni di assi autostradali a strade che possono riguardarsi, secondo le norme attuali, come secondarie.

In virtù di quanto detto, la categoria di intersezioni cui fare riferimento nei diversi casi risulta univocamente definita nella quasi totalità dei casi; nella Fig. 1 sono sinteticamente indicate per gli otto tipi di strade del C.d.S. le connessioni consentite e la categoria di intersezione. Si noti che alcune connessioni tra strade di ambiti territoriali differenti (ad es. C-D; E-C; ecc.) sono state indicate poiché in piccole aree urbane un'unica strada principale può assolvere più funzioni.

	A extraurbana	A urbana	B	C	D	E	F extraurbana	F urbana
A extraurbana	SV							
A urbana	SV	SV						
B	SV	SV	SV					
C	IS	IS	IS	RS / SM*				
D	SV	SV	SV	IS	SV / SM*			
E	IS	IS	IS	RS / SM	IS / SM*	RS / SM*		
F extraurbana	-	-	-	RS	-	RS	RS	
F urbana	-	-	-	RS	-	RS / SM	RS	RS

SV = Intersezione sfalsata con eventuali manovre di scambio (svincoli)

IS = Intersezione sfalsata con manovre di scambio e intersezioni a raso

SM = Intersezione semaforizzata

RS = Intersezione a raso

* In casi eccezionali per particolari situazioni locali

Fig. 1 – Matrice delle possibili connessioni fra i vari tipi di strade

A questo punto è necessaria l'ulteriore scelta della tipologia di intersezione fra le tante che possono concepirsi nell'ambito di ciascuna categoria. I fattori da considerare sono, ovviamente, gli stessi assunti per i tronchi stradali, vale a dire: sicurezza, funzionalità, impatto ambientale, costi di costruzione e manutenzione.

Con riferimento alla sicurezza è importante la localizzazione dell'incrocio: è

necessario che esso sia ben visibile e chiaramente percepito dagli utenti (da evitare i dossi ed i tratti con pendenze elevate) ed è desiderabile che le strade si intersechino sotto angoli non troppo acuti e comunque non minori di 70°. Inoltre, come sarà mostrato in seguito, tutti gli elementi geometrici vanno dimensionati con ipotesi particolarmente cautelative per quanto riguarda il comportamento degli utenti. Vanno infine considerate le statistiche della incidentalità per le varie tipologie che, in qualche modo, rappresentano un indice della maggiore o minore sicurezza.

La funzionalità (o efficienza) viene valutata determinando alcuni indici prestazionali particolarmente significativi quali: tempi medi di attesa, numero medio di veicoli in coda, ritardo medio totale, capacità di riserva, e, nelle rotatorie, capacità semplice e capacità complessiva. Per le intersezioni a livelli sfalsati la tipologia dipende dal modo con cui sono organizzate (o è possibile organizzare) le svolte a sinistra, ciò anche in relazione alla possibilità o meno di occupare tutti i quadranti.

Con riferimento agli aspetti ambientali vanno considerati gli ingombri planimetrici (rotatorie, alcuni tipi di svincoli) e quelli altimetrici che, nel caso di intersezioni sfalsate a più livelli, rappresentano una intrusione visiva a volte incompatibile con il paesaggio circostante. Per quanto riguarda gli effetti del traffico, va tenuto presente che rumore ed emissioni di gas di scarico e polveri aumentano soprattutto in corrispondenza delle intersezioni a raso: infatti, per le caratteristiche stesse della circolazione (flusso interrotto), contrassegnate dalla preminenza delle fasi di accelerazione e di decelerazione, nonché per le fluttuazioni di velocità dei regimi dei motori, sono particolarmente avvertibili da una parte le discontinuità dei livelli sonori, dall'altra le emissioni inquinanti di gas e polveri.

Per le intersezioni in ambito urbano particolare attenzione va riservata alle cosiddette utenze deboli (pedoni, ciclisti e veicoli a due ruote di piccola cilindrata) privilegiando l'uso del semaforo e/o attuando quelle misure che vanno sotto la dizione "traffic calming".

Almeno nei casi più complessi ed impegnativi la scelta non può essere fatta solo in base alle indicazioni normative ed alla esperienza ed alle conoscenze del progettista, ma deve essere supportata da un calcolo che metta a confronto i benefici ed i costi intesi nel senso più ampio. Vale a dire benefici e costi diretti ed indiretti considerando tutti i gruppi sociali e non i soli utenti. Si prestano a ciò le analisi multicriteria (o multiobiettivi) la cui descrizione esula dall'ambito di questa trattazione.

3. I dati per il progetto

I dati occorrenti per la scelta del tipo di incrocio e per la definizione di tutti gli elementi che lo compongono sono:

- a) una completa conoscenza dell'area su cui deve svilupparsi l'intersezione;
- b) le caratteristiche geometriche, in prossimità del nodo, dei rami confluenti, per lunghezze variabili a seconda dei casi da una ad alcune centinaia di metri;
- c) le velocità di riferimento (o di calcolo), V_c , per il dimensionamento degli elementi geometrici;
- d) i dati di traffico.

I punti a) e b) non necessitano di ulteriori chiarimenti.

Per quanto riguarda le velocità, i dati di traffico ed i criteri da seguire per il dimensionamento degli elementi geometrici, nel seguito si farà riferimento alle "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali" recentemente emanate in Italia [12], tenendo altresì conto delle principali normative straniere, nonché della più aggiornata letteratura tecnica.

Come velocità di riferimento V_c si può quindi assumere la velocità di progetto, come si ricava dal diagramma di velocità (cfr. la norma [11]) o la velocità V_{85} relative agli elementi di tracciato dei rami che confluiscono nel nodo.

Per le intersezioni esistenti, da adeguare o modificare, è opportuno acquisire direttamente la distribuzione delle velocità ed assumere per la velocità di riferimento V_c l'ottantacinquesimo percentile⁽¹⁾.

Essenziali per la scelta e la progettazione dell'incrocio sono i dati di traffico. E' necessario conoscere, per ciascuna corrente che giunge all'incrocio, le percentuali di veicoli in transito e quelle in svolta; è desiderabile disporre di dati disaggregati per componenti di traffico (autovetture, autocarri, autotreni, motocicli, ecc.) cui, nelle zone urbane, vanno aggiunte le cosiddette utenze deboli, vale a dire pedoni, biciclette e ciclomotori. I dati di traffico vanno riferiti a periodi differenti a seconda del fattore che si prende in considerazione: così, mentre per analisi ambientali - inquinamento acustico ed atmosferico - si possono considerare periodi di alcune ore o anche l'intera giornata considerando il Traffico Giornaliero Medio (TGM), nei riguardi della efficienza e funzionalità occorre riferirsi a periodi molto più brevi ed assumere a base delle verifiche le portate dell'ora di punta Q ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Non sempre è prudente riferirsi ai limiti legali posti tuttavia all'approccio di tutte le intersezioni.

⁽²⁾ Per le definizioni ed il significato di TGM e Q si rinvia al Cap.1 di [4].

In ogni caso è opportuno che i dati siano chiaramente rappresentati e ciò può farsi a mezzo di flussogrammi o di matrici O/D; in Fig. 2 sono esemplificate le due rappresentazioni per un incrocio a tre bracci; il significato della dizione “veicoli leggeri equivalenti” è chiarito nel Cap.2 di [4]

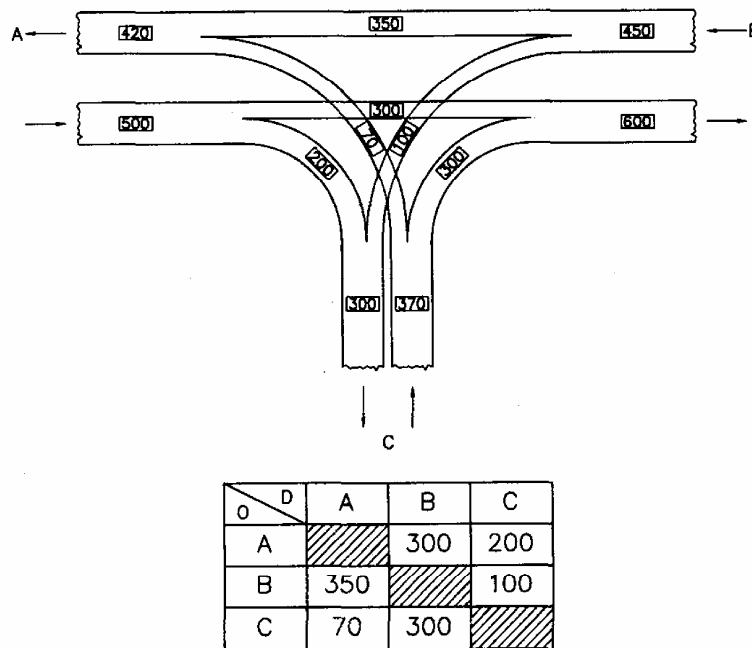


Fig. 2 –Presentazione dei dati di traffico. Flussogramma e matrice O/D.
Portate orarie in veicoli leggeri equivalenti.

4. Manovre elementari - Punti di conflitto

In corrispondenza di una intersezione ogni veicolo compie, in generale, alcune manovre consistenti essenzialmente in variazioni di velocità e/o di traiettoria che, per la presenza degli altri veicoli, non possono essere effettuate liberamente. Si generano quindi interferenze tra le correnti di traffico che vanno opportunamente disciplinate per garantire sicurezza e funzionalità nella maggior misura possibile.

La manovra complessiva che un veicolo compie all'incrocio è formata da almeno una delle seguenti tre manovre elementari:

- diversione (ovvero uscita);

- immissione (ovvero entrata);
- attraversamento (ovvero intersezione).

La diversione si ha quando un veicolo rallenta ed abbandona la corrente di cui fa parte per compiere una svolta a destra o a sinistra; la divergenza a destra è la più semplice tra le manovre, ma comporta pur sempre un rallentamento degli eventuali veicoli in transito che seguono.

La manovra di immissione in una corrente in transito può comportare un'attesa, poiché il veicolo che tende ad immettersi potrà farlo solo quando gli si presenta un intervallo di sufficiente ampiezza tra i veicoli del flusso in transito.

La manovra di attraversamento comporta l'attraversamento di una corrente e, al pari della precedente, può essere eseguita solo quando è sufficientemente ampio l'intervallo temporale tra due veicoli successivi della corrente da attraversare.

Infine, la manovra di scambio implica il cambio di corsia da parte di una parte di una o più correnti parallele che si muovono nella medesima direzione.

Qualunque sia la manovra da compiere per seguire un determinato percorso, si verificano, quindi, una o più interferenze fra correnti che rappresentano potenziali punti di collisione tra veicoli e che vengono denominati punti di conflitto. Il numero complessivo dei punti di conflitto dipende dal numero di rami che afferiscono al nodo, dalla tipologia dell'incrocio e dal sistema di regolazione. Ad es. in Fig. 3 sono indicati il numero complessivo ed i tre tipi di punti di conflitto per tre intersezioni a raso: si nota la drastica riduzione dei punti di conflitto con la regolazione semaforica negli incroci a quattro bracci; ulteriori riduzioni, o la eliminazione totale, dei punti di conflitto di attraversamento si conseguono con lo sfalsamento altimetrico.

5. La visibilità

Per il corretto e sicuro funzionamento delle intersezioni, di qualsiasi tipo, è necessario che i veicoli che giungono all'incrocio e che si apprestano a compiere le manovre di attraversamento o di immissione possano reciprocamente vedersi onde adeguare la loro condotta di guida nel rispetto dei modi di regolazione dell'incrocio stesso. Occorre quindi individuare le zone, denominate triangoli di visibilità, che debbono essere sgombre da qualsiasi ostacolo, di altezza superiore al metro, che impedirebbe ai veicoli di vedersi. Si riporta di seguito la determinazione dei lati dei triangoli di visibilità con riferimento ad una intersezione a raso a quattro bracci, potendosi poi, in modo del tutto analogo, controllare la visibilità in qualsiasi altro tipo di incrocio.

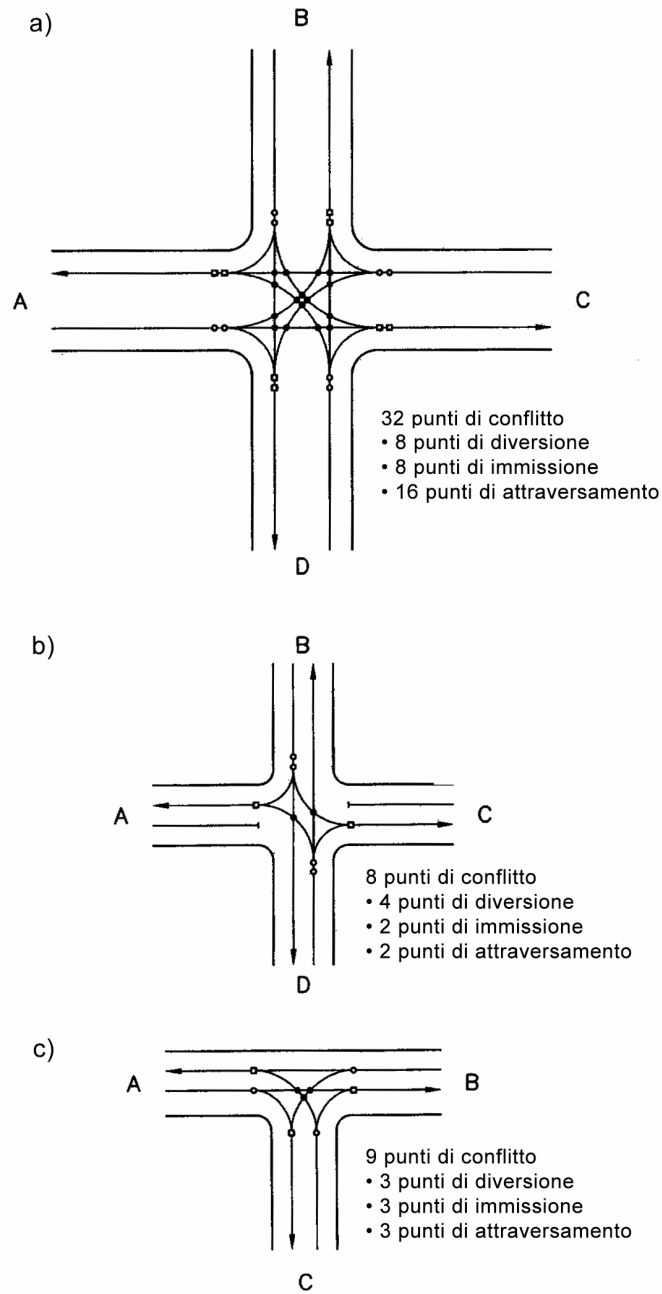


Fig. 3 – Punti di conflitto per tre tipologie di intersezione:
a) e c) libere; b) semaforizzata

In Fig. 4a è schematizzata l'intersezione fra due strade di modesta importanza ed a scarso traffico in cui l'unica forma di regolazione è quella indicata dal C.d.S., ossia di precedenza alla destra; in questo caso occorre che i veicoli si vedano reciprocamente quando distano dal potenziale punto di collisione di una distanza pari almeno a quella di arresto; i lati di ciascun triangolo sono pertanto uguali, per le strade indicate con 1 e 2, a D_{a1} e D_{a2} . Si osserva tuttavia che questa forma di regolazione non è più ammessa ([12] e [14])⁽³⁾, mentre le norme canadesi [15] la vietano in generale, ammettendola solo su strade extraurbane purché la somma dei TGM delle strade confluenti sia minore di 1000÷1500 veic/g e le velocità di approccio siano minori di 60 km/h.

Quando una delle due strade è vincolata dall'obbligo di precedenza (Fig. 4 b) si assume che il veicolo che deve dare precedenza, giunto a 20 m dal ciglio della strada principale, debba vedere il veicolo della strada principale ad una distanza L tale da avere il tempo di sgombrare completamente l'area di intersezione, ovvero svoltare a destra o a sinistra senza disturbare le correnti in transito. Il tempo occorrente per compiere in sicurezza una di tali manovre è assunto in [12] pari a 12 sec; ne derivano per L i valori $L = 12v$ (con v , in m/s, velocità di riferimento sulla strada principale) qui di seguito riportati con arrotondamenti.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
L (m)	100	130	165	200	235	265	300	330

Infine, nel caso di regolazione con STOP (Fig. 4c) si assume che un veicolo fermo a 3,00 m dalla linea di STOP debba vedere i veicoli della strada principale ad una distanza L' pari a $6v$ [12] in cui v , in m/s, è la velocità di riferimento sulla strada principale; i valori arrotondati di L' sono di seguito riportati.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
L' (m)	50	70	85	100	120	135	150	165

Va precisato che in base alla attuale Norma italiana [12] i valori di tempo di manovra sopra riportati di 12 s e di 6 s vanno incrementati di 1 s per ogni punto

⁽³⁾ A tale proposito le vigenti norme italiane [12] testualmente recitano: “Al fine di garantire il regolare funzionamento delle intersezioni a raso, e come principio di carattere più generale, occorre procedere sempre ad una gerarchizzazione delle manovre in modo da articolare le varie correnti veicolari in principali e secondaria; ne consegue la necessità di introdurre segnali di precedenza o di stop per ogni punto di conflitto, evitando di porre in essere situazioni di semplice precedenza a destra senza regolazione segnaletica.”

percentuale di pendenza longitudinale del ramo secondario superiore al 2%.

Ne segue, evidentemente, un incremento dei valori di L e di L' appena prima esposti.

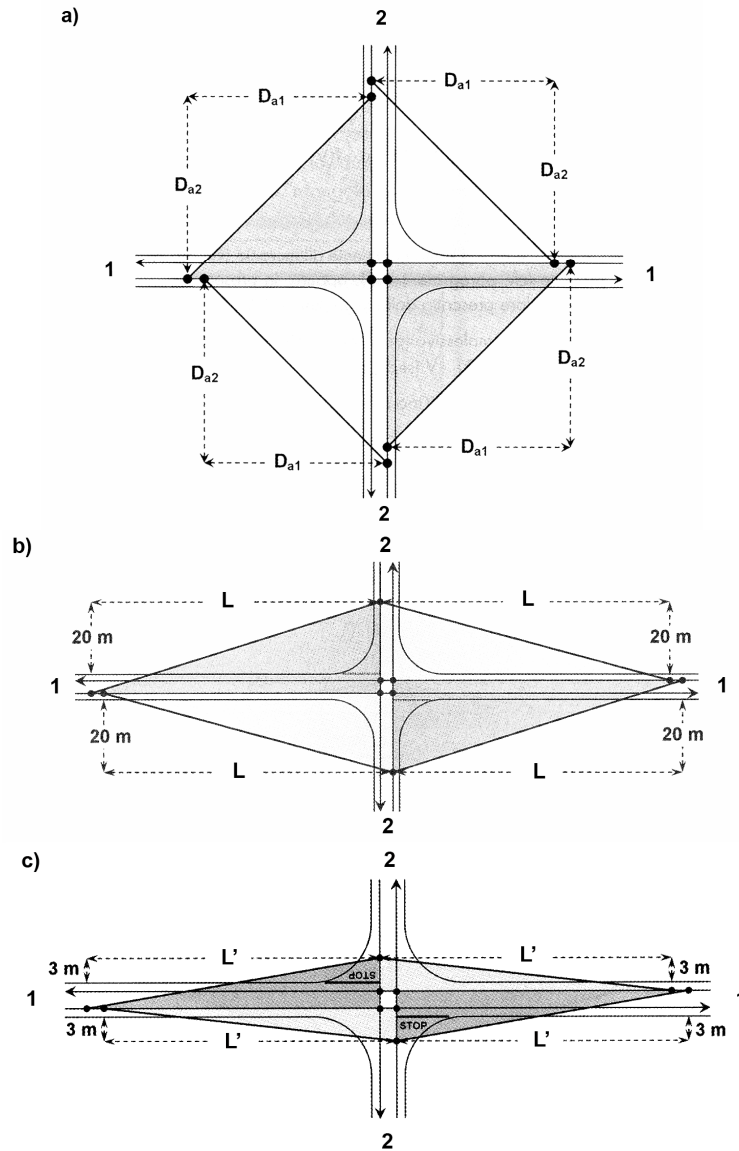


Fig. 4 – Triangoli di visibilità nei tre casi di regolazione: a) libera (C.d.S.);
b) con precedenza; c) con STOP

6. Intersezioni a raso di tipo lineare

Rientrano in questa categoria tutte le intersezioni non semaforizzate a tre o a quattro rami: infatti, benché geometricamente simili, gli incroci semaforizzati, per il funzionamento nettamente diverso, vengono trattati a parte. Inoltre, se nel nodo concorrono cinque o più rami, la soluzione a rotatoria appare senz'altro preferibile. Pertanto le strade cui si riferisce questa categoria di incroci sono quelle tipo C, E, F (Fig. 1). In dipendenza delle velocità di riferimento e della entità dei flussi possono essere diversamente organizzate a partire dalle configurazioni più semplici fino a quelle più complesse. Così, per strade tipo F a scarso traffico, ci si può limitare all'arrotondamento dei margini (con raggi di $7\div 10$ m) per consentire, sia pure a velocità molto bassa, la svolta dei veicoli (Fig. 5) o, al più, ad aggiungere sulla strada meno trafficata un'isola spartitraffico a goccia (Fig. 6). Con l'aumento delle velocità e dei volumi di traffico, per migliorare sicurezza e funzionalità, si può specializzare sempre più l'intersezione con l'inserimento di corsie specializzate – di decelerazione, di accelerazione, di accumulo – e con la canalizzazione ottenuta mediante isole a goccia e triangolari.

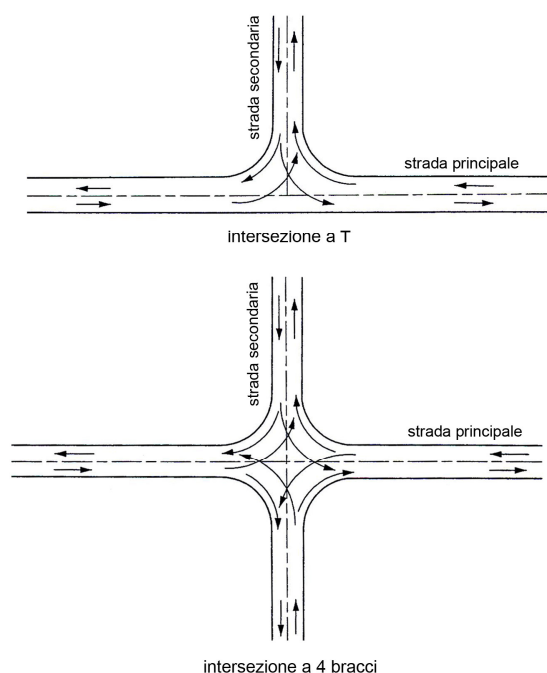


Fig. 5 – Intersezioni a raso a tre e quattro bracci fra strade di modesta importanza

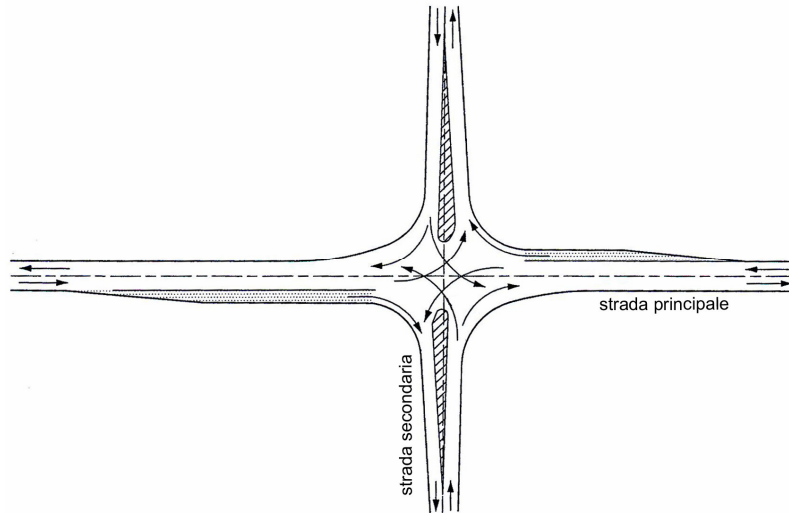


Fig. 6 – Intersezioni a raso a quattro bracci fra strade di modesta importanza con isole spartitraffico a goccia

In Tab. 1 sono riportate le prescrizioni della norma [12] circa la realizzazione di corsie specializzate (di entrata, di uscita e di accumulo per la svolta a sinistra) nelle intersezioni lineari a raso ed a livelli sfalsati; in particolare, sempre secondo le [12], “l’inserimento delle corsie specializzate, nei casi in cui queste sono “ammesse” deve essere valutato in relazione a criteri funzionali...”.

Tipo di strada principale	Tipologia di corsia specializzata		
	di uscita (o di diversione)	di entrata (o immissione)	d’accumulo per svolta a sinistra
strade extraurbane			
A	obbligatoria	obbligatoria	non ammessa
B	obbligatoria	obbligatoria	non ammessa
C	ammessa	non ammessa	ammessa
F	ammessa	non ammessa	ammessa
strade urbane			
A	obbligatoria	obbligatoria	non ammessa
D	ammessa	ammessa	non ammessa
E	ammessa	ammessa	ammessa
F	ammessa	ammessa	ammessa

Tab. 1 – Prescrizioni della norma [12] circa la realizzazione delle corsie specializzate

In Fig. 7 ed in Fig. 8 sono riportati alcuni schemi di incroci a tre e quattro rami in ambito extraurbano in cui una delle due strade è considerata secondaria, o perché gerarchicamente inferiore (ad es. F rispetto a C), o perché, a parità di rango, è meno trafficata. La regolazione è attuata con segnali di STOP per le correnti in svolta a sinistra dalla principale alla secondaria e per tutte le correnti di quest'ultima, con la ulteriore regola che i veicoli fermi allo STOP sulla strada principale hanno precedenza su quelli fermi allo STOP sulla secondaria. Dalle figure si rileva che sono state posizionate in tutti i casi, nella parte centrale della strada principale, corsie di attesa (di accumulo) per i veicoli che svoltano a sinistra e, sempre sulla strada principale, corsie di decelerazione (ad ago o parallele) che agevolano la manovra di uscita. Con riferimento alle manovre di immissione si osserva che non sono previste apposite corsie di accelerazione perché sono ritenute oggi potenzialmente pericolose per le strade C ed F extraurbane ([12], [14], [15]); esse sono ammesse solo in ambito urbano per le strade tipo D, E ed F (cfr. ad es. Fig. 9).

Per quanto riguarda la opportunità di inserimento delle corsie specializzate ammesse, la valutazione va quindi fatta caso per caso tenendo conto dell'entità dei flussi che interferiscono e della velocità di riferimento della strada principale, con i criteri ed i metodi illustrati nel Cap.4 di [4].

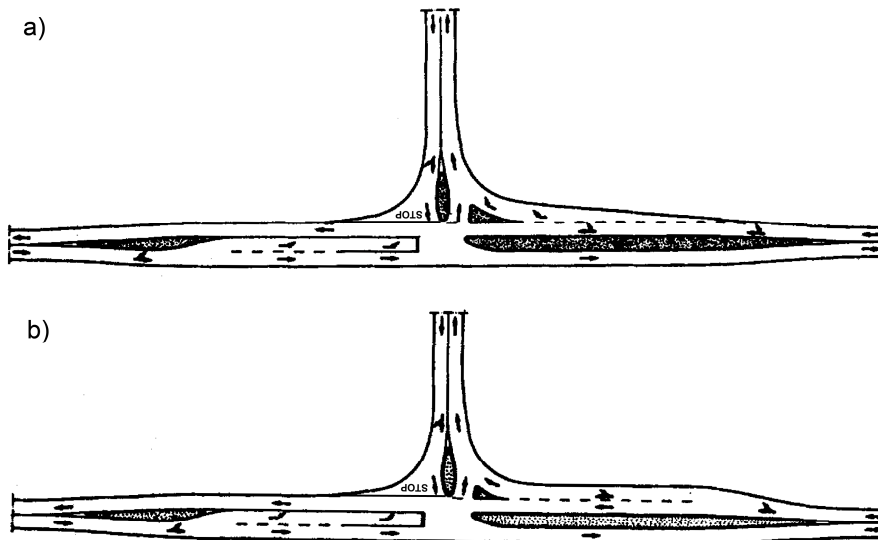


Fig. 7 – Schemi di intersezioni a raso a tre bracci (o a T)

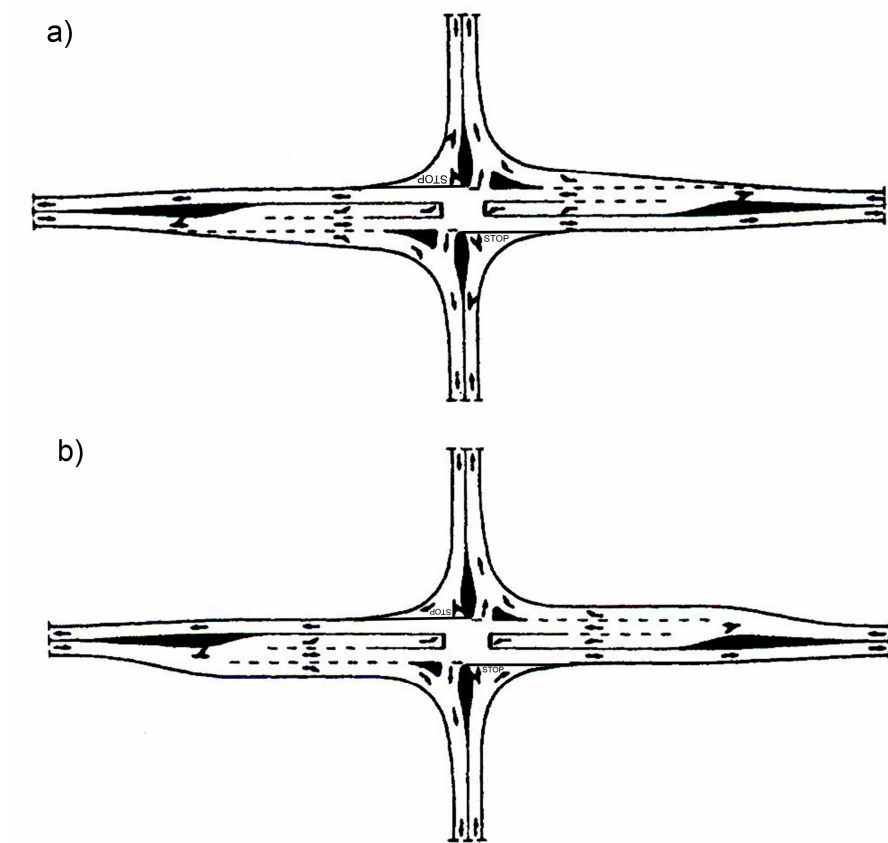


Fig. 8 – Schemi di intersezioni a quattro bracci

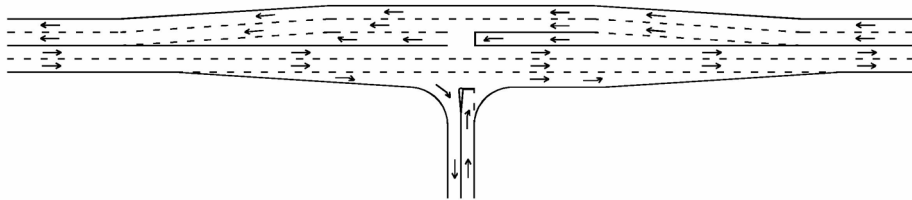


Fig. 9 – Esempio di incrocio per il quale sono ammesse le corsie di accelerazione e di decelerazione (ad es. strada tipo E)

Possono, tuttavia, darsi alcune indicazioni, valide essenzialmente per le strade C ed F, utili nella fase preliminare di progettazione; esse sono sintetizzate in Tab. 2 ed in Tab. 3 che seguono, in cui sono indicate con Q_T la portata oraria complessiva sulla strada principale, con Q_D la portata oraria in una sola direzione sulla strada principale e con Q_S la portata oraria dei veicoli che svoltano.

Q_T (veic/h) \ Q_S (veic/h)	fino a 20	20÷100	oltre 100
fino a 600	non occorre	da verificare	da inserire
600÷800	da verificare	da inserire	da inserire (*)
oltre 800	da inserire	da inserire (*)	(*)

(*) Va verificata l'opportunità di cambiare schema

Tab. 2 - Inserimento della corsia di accumulo sulla strada principale

Q_D (veic/h) \ Q_S (veic/h)	fino a 30	30÷100	oltre 100
fino a 400	no	da verificare	sì
400÷600	no	sì	sì
oltre 600	sì	sì	sì

Tab. 3 - Corsie di decelerazione sulla strada principale

Inoltre le portate della strada secondaria in attraversamento o in svolta a sinistra debbono essere piuttosto basse altrimenti, soprattutto le intersezioni a quattro bracci, in considerazione dei numerosi punti di conflitto di intersezione, vanno in crisi. Soluzioni alternative possono essere la rotatoria, ovvero, sempre che sia possibile, lo sfalsamento planimetrico con il quale si sostituisce l'incrocio a quattro bracci con due incroci a tre bracci ottenendo così schemi del tipo di quelli riportati nella Fig. 10.

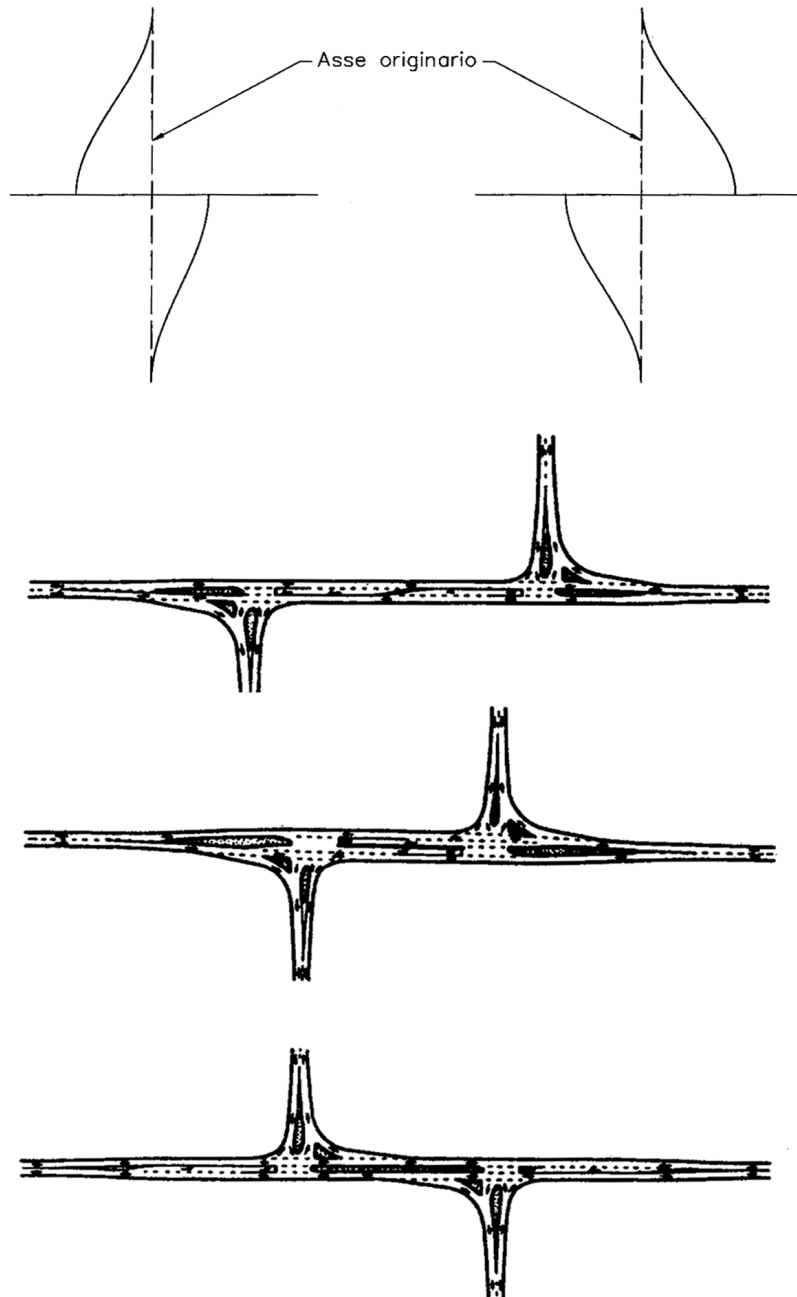


Fig. 10 – Esempi di sfalsamenti planimetrici

6.1. Dimensionamento degli elementi geometrici per le intersezioni a raso

Gli elementi da definire sono i moduli di corsia, le lunghezze delle corsie addizionali, le larghezze dei “canali” di svolta delimitati dalle isole che realizzano la canalizzazione, l’andamento dei cigli.

6.1.1. Moduli di corsie per le intersezioni a raso

Le corsie destinate al traffico in transito conservano la dimensione corrente che, comunque, non deve essere inferiore a 3,00 m; le larghezze delle corsie specializzate sono consegnate nella Tab. 4, tratta da [12].

Come è possibile notare dalla Tab. 4, la [12] non fornisce indicazioni sulla larghezza delle corsie di immissione, anche per i casi in cui esse sono ammesse (all’intersezione tra assi E ed F in ambito urbano); secondo indicazioni prevalenti nella letteratura tecnica straniera può assumersi per detta larghezza un valore pari a 3 m.

Elemento modulare	Strade extraurbane		Strade urbane	
	Tipo di strada principale	Larghezza corsie (m)	Tipo di strada principale	Larghezza corsie (m)
Corsie destinate alle traiettorie passanti	nei casi ammessi	(*)	nei casi ammessi	(*)
Corsie specializzate di uscita	C	3,50	E	3,00
	F	3,25	F	2,75
Corsie specializzate per l’accumulo in mezzera	C	3,25	E	3,00 (**)
	F	3,00	F	2,75 (**)

(*) si mantiene la larghezza delle corsie prevista dal D.M. 5/11/2001 per i tipi di strada interessati dall’intersezione

(**) riducibili a 2,50 m se le corsie non sono percorse da traffico pesante o da mezzi adibiti al trasporto pubblico.

Tab. 4 – Moduli delle corsie specializzate sulla strada principale [12]

6.1.2. Corsie di uscita (decelerazione) per le intersezioni a raso

Con esse si eliminano i punti di conflitto delle manovre di diversione; in Fig. 11 è riportato un esempio di corsia di decelerazione. Come è possibile notare, essa è in genere costituita da un primo tratto, di lunghezza L_c , lungo cui avviene lo spostamento trasversale (tronco di manovra) e da un tratto parallelo, di lunghezza L_d , lungo il quale si attua la decelerazione.

Le norme danno valori di 30 e 20 m, rispettivamente per strade extraurbane ed urbane; questi valori sono da intendersi come minimi, mentre può essere opportuno, quando possibile, assumere lunghezze comprese fra 30 e 60 m per velocità iniziali (o di riferimento) da 40 a 90 km/h.

Con la solita ipotesi di moto uniformemente vario si calcola poi la lunghezza del tronco di decelerazione mediante la

$$L_d = \frac{v_c^2 - v_R^2}{2 \cdot (a \pm i/10)} \quad (1)$$

in cui v_c e v_R sono, rispettivamente, la velocità di riferimento e la velocità compatibile con il raggio di svolta R , espresse m/sec; la decelerazione “ a ” è assunta, di norma, pari a $2 \div 2,4 \text{ m/sec}^2$; la pendenza è espressa in percento.

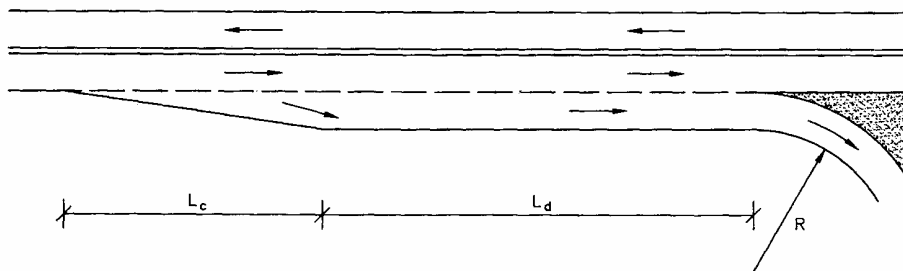


Fig. 11 – Schema di corsia di uscita (decelerazione)

Si precisa che lungo le curve di svolta la pendenza trasversale viene usualmente mantenuta pari al 2,5 % per cui, con $f_t = 0,10$ in tutti i casi risulta

$$v_R = \sqrt{2,5 \cdot R} \quad (2)$$

Nei casi in cui risulta $L_d \leq 40 \text{ m}$ può adottarsi la conformazione ad “ago” (si parla in tal caso di pseudo-corsia) come indicato negli schemi a) di Fig. 7 e Fig. 8.

Con specifico riferimento ora alle attuali Norme italiane sulle intersezioni [12], le corsie di uscita, lì dove si ritiene di adottarle, vanno configurate come in Fig. 12; esse risultano composta dai seguenti tratti (si adotta la simbologia della [12]):

- tratto di manovra, di lunghezza $L_{m,u}$;
- tratto di decelerazione, di lunghezza $L_{d,u}$ (comprendente metà della lunghezza del tratto di manovra $L_{m,u}$) parallelo all’asse principale della strada, nel caso di tipologia parallela (Fig. 12a), o coincidente interamente con l’elemento a curvatura variabile, nel caso di tipologia ad ago (Fig. 12b).

La lunghezza $L_{m,u}$ del tratto di manovra va posta pari a 30 m in ambito extraurbano ed a 20 m in ambito urbano.

La lunghezza $L_{d,u}$ del tronco di decelerazione deve essere dimensionata con criteri cinematici, utilizzando la (1) con i valori di v da determinare come già detto, $i = 0$ ed $a = 2,0 \text{ m/s}^2$.

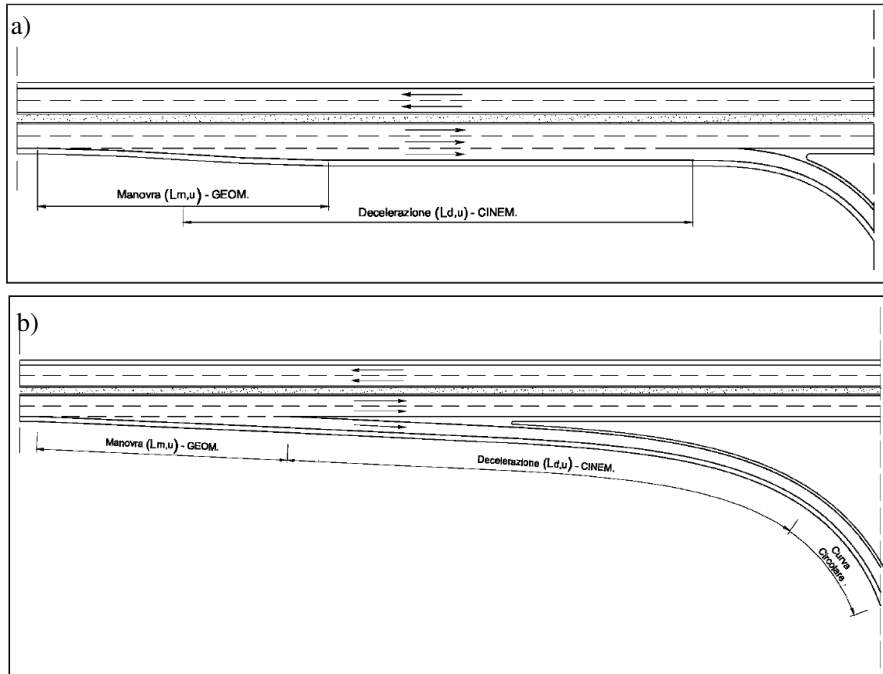


Fig. 12 – Possibili configurazioni delle corsie di uscita secondo le norme italiane [12]

6.1.3. Corsie di immissione per le intersezioni a raso

Con l'adozione di queste corsie, ammesse dalle Norme [12], come detto, solo per alcuni tipi di strade (strade tipo E e F urbane - cfr. Tab. 1), vengono attenuati, al limite eliminati, gli inconvenienti (conflitti) derivanti dalle manovre di immissione.

In Fig. 13 ne è riportato un esempio.

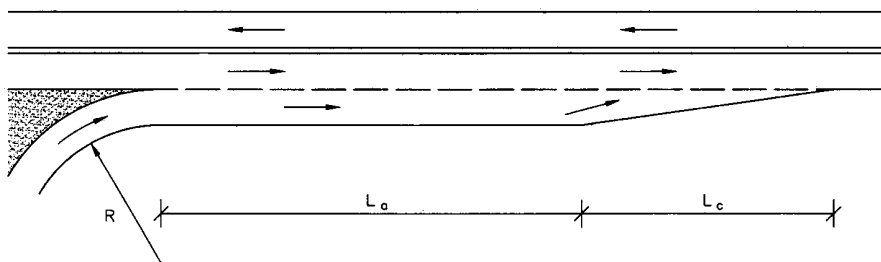


Fig. 13 – Schema di corsia di immissione

Impropriamente denominate corsie di accelerazione, le corsie di immissione sono, in effetti, corsie di attesa in movimento; infatti i veicoli le percorrono a velocità pressoché costante in attesa che si presenti, tra i veicoli della corrente principale, un intervallo tale da potersi inserire senza tema di essere tamponati; la manovra è tanto più agevole quanto minore è la differenza di velocità tra i veicoli in transito e quelli che tendono ad immettersi. Il presentarsi dell'intervallo sufficiente è, in ogni caso, un evento aleatorio, per cui l'attesa, e quindi la lunghezza L_a , va determinata avvalendosi dei metodi illustrati nel §4.10 di [4].

È opportuno, peraltro, che la lunghezza L_a del tronco parallelo sia tale da consentire ai veicoli che lo percorrono di raggiungere una velocità prossima a quella di riferimento prima che esso termini; all'uopo si usa ancora la (1) nella quale si assume però $a = 1,0 \div 1,2 \text{ m/s}^2$ e V_c pari circa all'80% della velocità di progetto della strada principale.

Per quanto attiene alla lunghezza del tronco di manovra L_c sono adottabili valori pari a quelli indicati per le corsie di uscita.

Con specifico riferimento ora alle attuali Norme italiane sulle intersezioni [12], le corsie di immissione vanno configurate come in Fig. 14, risultando costituite dai seguenti tratti (si adotta la simbologia della [12]):

- tratto di accelerazione, di lunghezza $L_{a,e}$;
- tratto di immissione, di lunghezza $L_{i,e}$;
- elemento di raccordo, di lunghezza $L_{v,e}$.

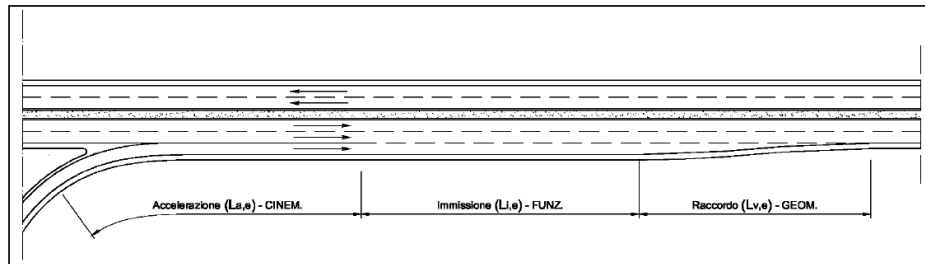


Fig. 14 – Configurazione delle corsie di immissione secondo le norme italiane [12]

La lunghezza $L_{a,e}$ del tronco di accelerazione deve essere determinata con criteri cinematici, con la (1) assumendo V_c pari all'80% della velocità di progetto della strada sulla quale la corsia si immette, v_R pari alla velocità compatibile con il raggio di svolta nel punto di inizio del tratto di accelerazione della corsia di entrata, $i = 0$ e $a = 1,0 \text{ m/s}^2$.

La lunghezza $L_{i,e}$ del tronco di immissione deve essere dimensionata con criteri funzionali “secondo procedure basate sulla distribuzione probabilistica dei distanziamenti temporali tra i veicoli in marcia, su ciascuna corsia”

Per quanto attiene invece al dimensionamento della lunghezza $L_{v,e}$ dell'elemento di raccordo negli incroci a raso, le [12] prescrivono esclusivamente che esso debba essere effettuato con criteri geometrici senza fornire alcuna altra indicazione.

Poiché la lunghezza $L_{v,e}$, come quella omologa della Fig. 11 e della Fig. 13, dipende dalla entità dello spostamento trasversale (ossia dal modulo della corsia) e dalla velocità si possono utilizzare i valori già richiamati al §6.1.2 per L_c .

6.1.4. Corsie di accumulo per le intersezioni a raso

Sono destinate ad accogliere i veicoli impegnati nella svolta a sinistra verso la strada secondaria, che debbono dare precedenza alla corrente opposta della strada principale.

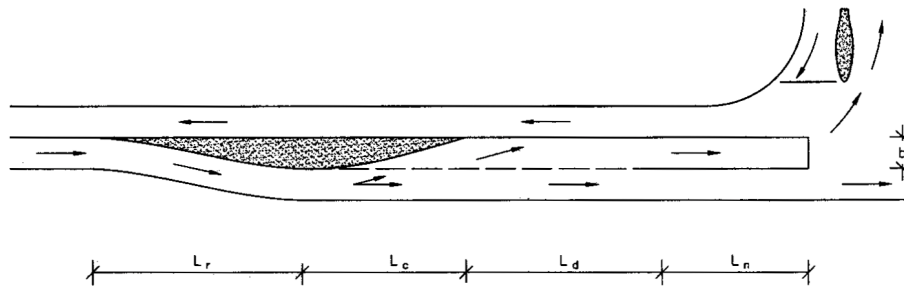


Fig. 15 – Schema di corsia di accumulo

La Fig. 15 mostra che una corsia di accumulo è formata da tre tratti: il primo necessario per la deviazione, la cui lunghezza L_c può valutarsi come indicato per le corsie precedenti; il secondo destinato alla decelerazione, la cui lunghezza L_d si valuta ancora con la (1) in cui dovrebbe però porsi $v_R = 0$ (arresto). Tuttavia, in considerazione del fatto che la lunghezza L_n del tratto di accumulo viene calcolata di norma con riferimento al 95° percentile della lunghezza della coda, può assumersi $v_R \neq 0$; in particolare in [12] viene assunto $v_R = 6,95$ m/s (25 km/h). Nel terzo tratto sostano i veicoli in attesa di svoltare: questa manovra risulta possibile quando nella corrente opposta da attraversare si presenta un varco (intervallo) di ampiezza tale da consentire la manovra stessa senza rischio di collisione. Se durante l'attesa del veicolo fermo allo STOP ne

sopraggiungono altri, si forma una coda ed il tratto L_n deve essere di lunghezza tale da accogliere, con sufficiente probabilità, tutti i veicoli in attesa. Sia il presentarsi dell'intervallo utile che il sopraggiungere di veicoli sono eventi aleatori per cui la lunghezza L_n , come già detto, va determinata con la teoria dei fenomeni di attesa (cfr. § 4.10 di [4]). Per studi preliminari ci si può avvalere del suggerimento delle norme canadesi [15]:

$$L_n = \frac{Q \cdot \ell}{30} \text{ (m)}$$

in cui Q è la portata oraria di progetto ed ℓ è la lunghezza media del veicolo da assumere pari a 6,00 m (7,00 m per percentuali elevate di traffico pesante).

Con specifico riferimento ora alle attuali Norme italiane sulle intersezioni [12], le corsie di immissione vanno configurate come in Fig. 16, risultando costituite, in ambito extraurbano, dai seguenti tratti (si adotta la simbologia della [12]):

- tratto di raccordo, di lunghezza $L_{v,a}$;
- tratto di manovra, di lunghezza $L_{m,a}$;
- tratto di decelerazione, di lunghezza $L_{d,a}$;
- tratto di accumulo, di lunghezza $L_{a,a}$.

In ambito urbano la configurazione delle corsie di accumulo prevede i soli tratti di raccordo e di accumulo.

Le lunghezze $L_{v,a}$ del tratto di raccordo e $L_{m,a}$ del tratto di manovra devono essere determinate con criteri di tipo geometrico.

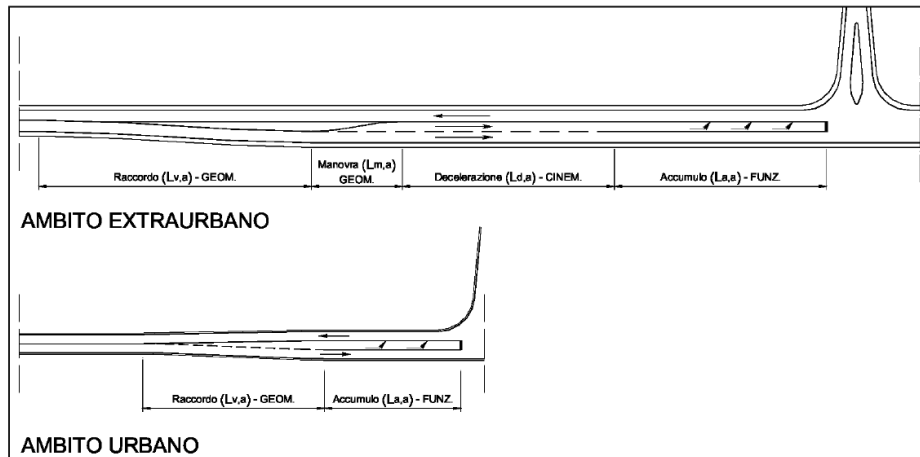


Fig. 16 – Configurazioni delle corsie di accumulo secondo le norme italiane [12]

In particolare, sempre secondo [12], “la lunghezza del tratto di raccordo $L_{v,a}$ dipende dalla velocità di progetto V_p [km/h] e dall’allargamento d [m] da raggiungere” (cfr.Fig. 17), “pari alla larghezza della corsia di accumulo incrementata di 0,50 metri (larghezza necessaria per la materializzazione dell’elemento separatore dei due sensi di marcia)” mediante la relazione

$$L_{v,a} = 0,6 \cdot V_p \cdot \sqrt{d'} \text{ [m]}$$

Ancora le Norme italiane [12] prescrivono inoltre che deve essere comunque assicurata una lunghezza $L_{v,a}$ minima di 20 m, ma non forniscono criteri, una volta nota la lunghezza $L_{v,a}$, per la profilatura del tratto. Per essa possono seguirsi ad es. i criteri esposti al successivo §6.1.5 dedicato alla geometria dei margini.

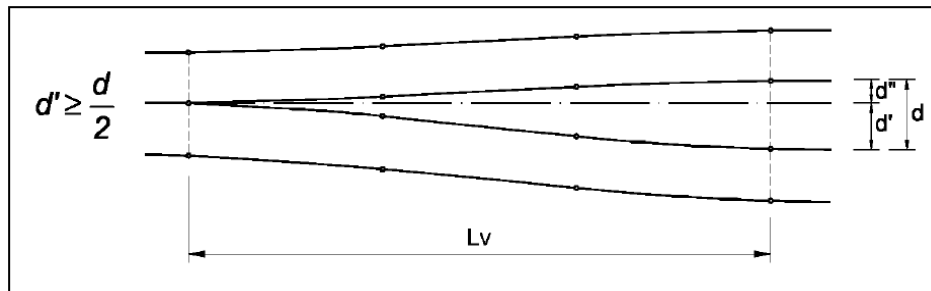


Fig. 17 – Tratto di raccordo nelle corsie di accumulo per la svolta a sinistra

La lunghezza $L_{m,a}$ del tratto di manovra si determina in base al valore della velocità di progetto secondo quanto riportato in Tab. 5 tratta da [12].

V_p [km/h]	$L_{m,a}$ [m]
≥ 60	30
< 60	20

Tab. 5 – Determinazione della lunghezza del tratto di manovra nelle corsie di accumulo

La lunghezza $L_{d,a}$ del tratto di decelerazione deve essere dimensionata con criteri cinematici, utilizzando la (1), assumendo per V_c la velocità di progetto da cui proviene il flusso di svolta, determinata dai diagrammi di velocità, $v_R = 6,95 \text{ m/s}$, $i = 0$ e $a = 2,0 \text{ m/s}^2$.

La lunghezza $L_{a,a}$ del tratto di accumulo deve essere determinata con criteri di tipo funzionale; in particolare le [12] prescrivono di assegnare a questi tratti una lunghezza doppia di quella corrispondente al numero medio di veicoli in

attesa (da determinarsi secondo le regole ed i criteri della tecnica della circolazione) e considerando uno spazio occupato da ciascun veicolo mediamente pari a 6 m.

Per quanto riguarda l'impiego delle corsie di accumulo nelle intersezioni lineari a raso sempre le Norme italiane [12] prevedono che esse debbano essere sempre realizzate nel caso di intersezione di strade con 2 corsie per senso di marcia, mentre nel caso di intersezioni di strade ad 1 corsia per senso di marcia la previsione delle corsie di accumulo è posta in relazione ai flussi di traffico.

6.1.5. Geometria dei margini

Per l'inserimento di corsie specializzate al centro della strada principale questa deve essere allargata, il che comporta una deviazione con una manovra di curva e controcurva (Fig. 15); la lunghezza L_r del tratto lungo cui avviene la deviazione dipende dallo spostamento laterale, ossia dall'allargamento, e dalla velocità. Per dedurre la lunghezza L_r si assume per semplicità che la traiettoria del veicolo sia costituita da due archi di cerchio percorsi in senso opposto (Fig. 18) di raggio R tale che l'accelerazione trasversale sia pari a $0,86 \text{ m/s}^2$.

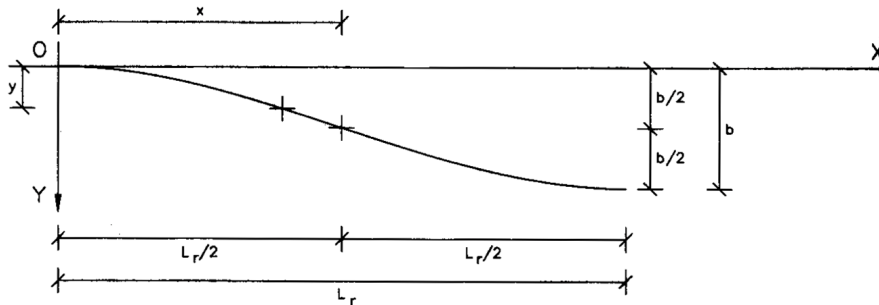


Fig. 18 – Sagomatura del ciglio esterno per allargamento della carreggiata

Risulta

$$\left(\frac{L_r}{2}\right)^2 = \frac{b}{2} \cdot \left(2R - \frac{b}{2}\right) \cong b \cdot R$$

$$\frac{v^2}{R} = \frac{v^2 4b}{L_r^2} = 0,86$$

da cui

$$L_r = \frac{2v\sqrt{b}}{0,92} \cong \frac{2V\sqrt{b}}{3,6 \cdot 0,92} \cong 0,6 \cdot V \cdot \sqrt{b} \quad (3)$$

Il ciglio viene comunque sagomato secondo due archi di parabola e può essere tracciato come indicato in

Fig. 18 avvalendosi delle espressioni:

$$\begin{aligned} y &= \frac{2b}{L_r^2} x^2 && \text{per } 0 \leq x \leq \frac{L_r}{2} \\ y &= b - \frac{2b}{L_r^2} (L - x)^2 && \text{per } \frac{L_r}{2} \leq x \leq L \end{aligned} \quad (4)$$

In [16] viene invece proposto di suddividere la lunghezza L_r in tre parti: la prima e la terza, pari ambedue ad $L_r/4$, hanno andamento circolare, mentre la parte centrale ($L_r/2$) ha andamento rettilineo.

La corsia di accumulo, invece che sulla destra, come in Fig. 15, può essere inserita simmetricamente rispetto all'asse della strada; ciò comporta una diminuzione di L_r , poiché nella (3) va posto $b/2$ al posto di b , ma la necessità di deviare entrambe le correnti della strada principale.

Con i criteri fin qui esposti per la sagomatura relativa alle corsie di accumulo per la svolta a sinistra possono profilarsi i tronchi di manovra delle corsie di uscita ed immissione (ad es. raccordi $L_{m,u}$ e $L_{v,e}$ delle Norme italiane [12] – cfr. Fig. 12 e Fig. 14).

I cigli esterni per le svolte a destra vengono di norma progettati con raggi piccoli, accettando velocità modeste onde contenere l'area dell'intersezione. Piuttosto che curve ad unico raggio - eventualmente raccordate con brevi archi di clotoide - si preferisce utilizzare un raccordo formato da tre archi di cerchio noto come curva tricentrica (Fig. 19); ciò perché essa si avvicina abbastanza alla curva "trattrice".

In genere vengono suggeriti i seguenti rapporti tra gli angoli e tra i raggi:

$$\alpha = \delta; \quad \beta = 5,5 \cdot \alpha; \quad R_1 : R_2 : R_3 = 2,5 : 1 : 5,5$$

Altre norme [15] ammettono valori un pò diversi ed anche la tricentrica non simmetrica ($\alpha \neq \delta$).

Per il raggio minimo R_2 si possono assumere valori compresi fra 6÷8 m e 20÷30 m a seconda dell'importanza dell'incrocio e del prevedibile numero di mezzi molto ingombranti. Per facilità di tracciamento si riportano le formule per il calcolo della lunghezza delle tangenti T_1 e T_2 :

$$\begin{aligned} T_1 &= (R_1 - R_2) \operatorname{sen} \alpha + \frac{R_3 - (R_3 - R_2) \cos \delta}{\operatorname{sen} \gamma} - \frac{R_1 - (R_1 - R_2) \cos \alpha}{\operatorname{tg} \gamma} \\ T_2 &= (R_3 - R_2) \operatorname{sen} \delta + \frac{R_1 - (R_1 - R_2) \cos \alpha}{\operatorname{sen} \gamma} - \frac{R_3 - (R_3 - R_2) \cos \delta}{\operatorname{tg} \gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

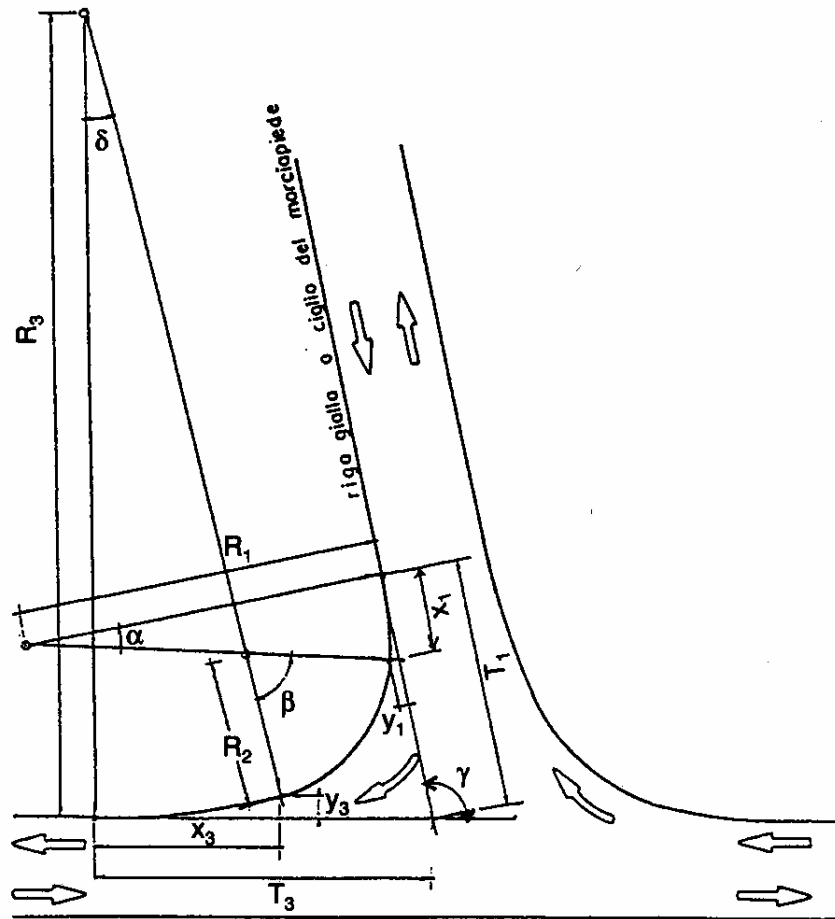


Fig. 19 – Elementi della curva tricentrica

6.1.6. Isole di canalizzazione

Le intersezioni a livello presentano spesso aree molto ampie in conseguenza degli allargamenti dovuti alle corsie addizionali ed agli arrotondamenti per le svolte; se si pavimentasse tutta questa superficie lasciando agli utenti la libertà di scelta delle traiettorie si moltiplicherebbero i punti di conflitto con pregiudizio per la sicurezza ed il funzionamento della intersezione stessa. E' necessario, quindi, che i conducenti siano obbligati a seguire determinate traiettorie, così da raccogliere ed ordinare i punti di conflitto. Si raggiunge lo scopo mediante le isole di canalizzazione con le quali si realizza, appunto, la canalizzazione del traffico.

Si ottengono in tal modo numerosi vantaggi quali:

- riduzione dell'area pavimentata;
- separazione e distanziamento dei punti di conflitto;
- controllo degli angoli fra le traiettorie che se si intersecano (possibilmente compresi fra 70° e 110°);
- controllo delle velocità;
- facilitazioni a favore dei pedoni, in ambito urbano;
- aree per l'installazione di segnaletica verticale.

Con riferimento alla funzione prevalente le isole possono suddividersi in: divisionali, direzionali e di rifugio (o pedonali) anche se spesso la stessa isola assolve due o anche tutte e tre le funzioni. Per quanto riguarda la forma, pur nella varietà di configurazioni che possono presentarsi, sono individuabili tre tipi: rettangolare allungata, triangolare, a goccia; le dimensioni sono variabili da caso a caso ma, come criterio generale, la canalizzazione va attuata con poche isole grandi e non con molte isole piccole che indurrebbero confusione negli utenti. Così le isole rettangolari debbono essere larghe non meno di 1,20÷1,50 m e lunghe almeno 6,00 m; i lati delle isole triangolari devono essere lunghi almeno 3,50 m.

A titolo di esempio nella Fig. 20 sono indicate due isole a goccia; per una di esse sono riportati i principali elementi geometrici e si fa rilevare la dissimmetria rispetto all'asse stradale; per l'altra si mostrano alcuni particolari costruttivi. In Fig. 21 sono indicate due isole triangolari e una lunga isola divisionale inserita lungo una strada principale con corsia di accumulo per la svolta a sinistra.

Le isole possono essere realizzate con semplice verniciatura ed in tal caso la loro funzione dipende dal rispetto delle regole da parte dei conducenti.

In aggiunta possono essere delineate da borchie, delineatori o essere pavimentate diversamente dalle parti transitabili, ad es. in cubetti o altro materiale, affinché vi sia una migliore percezione visiva, ed anche sonora, dell'isola. Più efficaci sono indubbiamente le delimitazioni con cordoli che possono essere sormontabili (ed in tal caso l'altezza è inferiore ai 20 cm) o, se lo si ritiene necessario, non sormontabili (a barriera); alcuni tipi di cordoli sono in Fig. 22.

All'interno l'isola rialzata può essere pavimentata, principalmente se funge anche da rifugio pedonale, o sistemata a prato.

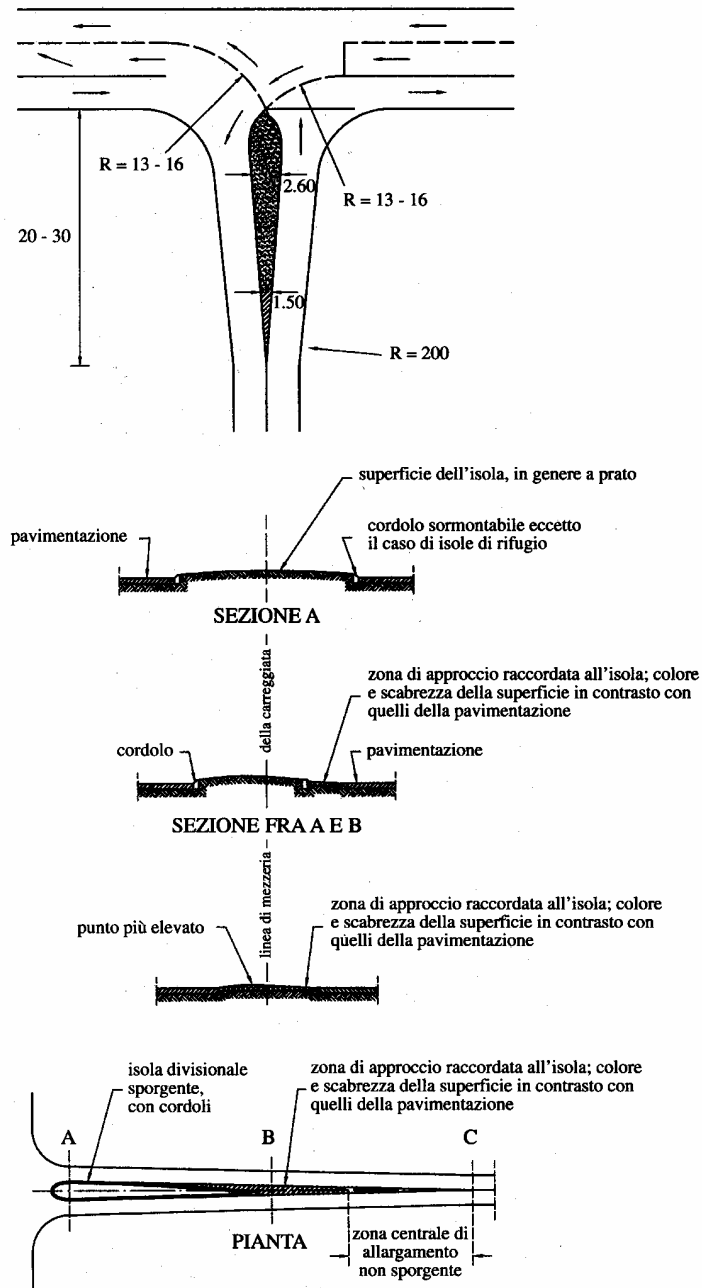


Fig. 20 – Esempi di isola a goccia

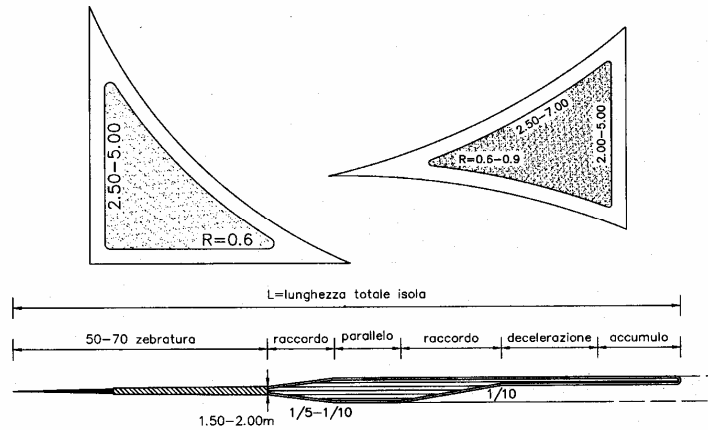


Fig. 21 – Isole triangolari e isola divisionale su strada principale con corsia di accumulo per svolta a sinistra

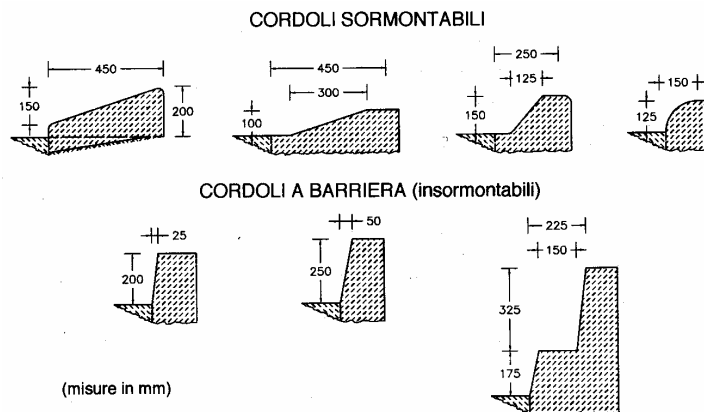


Fig. 22 – Alcuni tipi di cordolo

Particolare attenzione deve essere infine posta alla larghezza dei “canali” delimitati dalle isole in considerazione degli angoli di deviazione (non di rado superiori a 90°) e dei modesti raggi di curvatura delle svolte; occorrono dimensioni di $4,50 \div 5,00$ m purché sia del tutto eccezionale la presenza di grossi autocarri ed autoarticolati, altrimenti occorrono larghezze maggiori. In proposito possono essere utili le schede trasparenti annesse al capitolo “Carrefours” (Intersezioni) delle Norme Svizzere [16], due delle quali - per un autocarro ed un autotreno - sono riportate integralmente in Fig. 23 ed in Fig. 24.

In esse sono disegnati a tratto intero gli ingombri dei veicoli per diversi angoli di deviazione espressi in gradi centesimali; le linee punteggiate indicano

le traiettorie della ruota anteriore esterna, mentre il raggio R_H individua la traiettoria virtuale del punto di mezzzeria dell'asse anteriore; dal grafico si può determinare l'ingombro massimo in curva del veicolo e, aggiungendo gli opportuni franchi (50÷60 cm), la larghezza del canale.

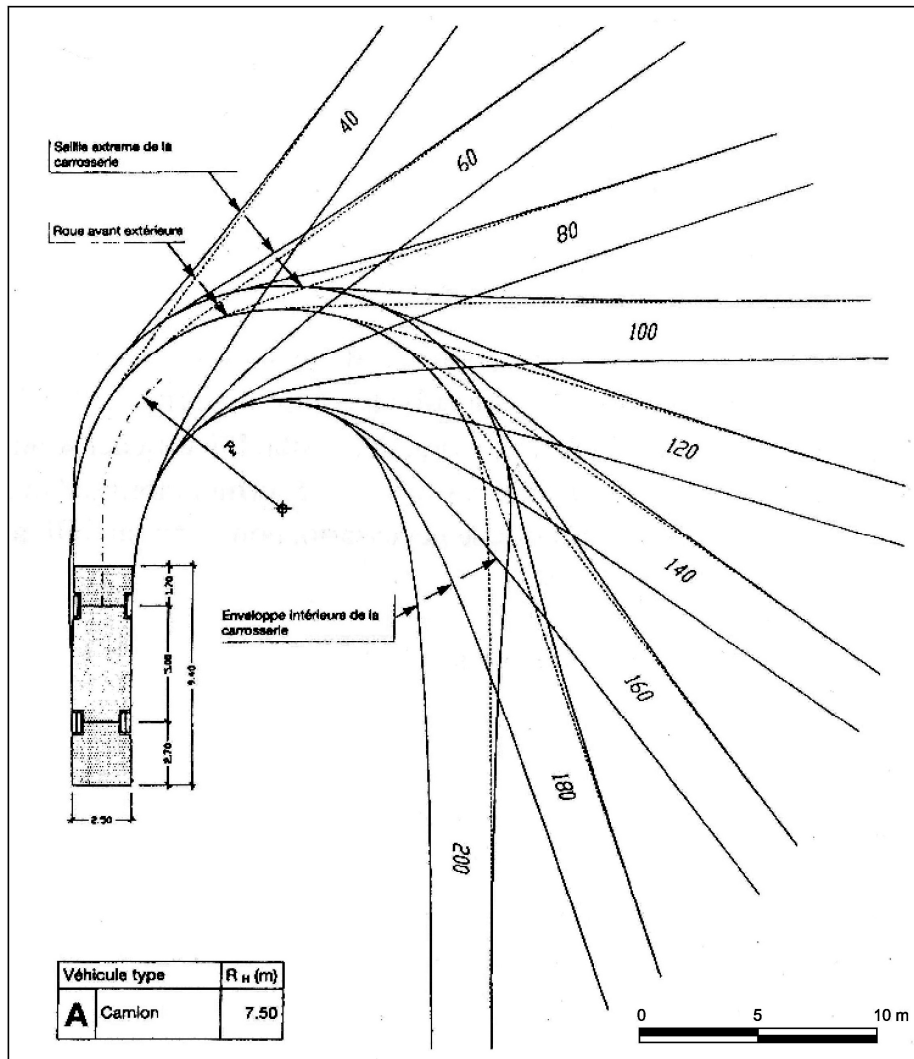


Fig. 23 – Ingombro in curva di un veicolo commerciale senza rimorchio secondo le Norme Svizzere [16]

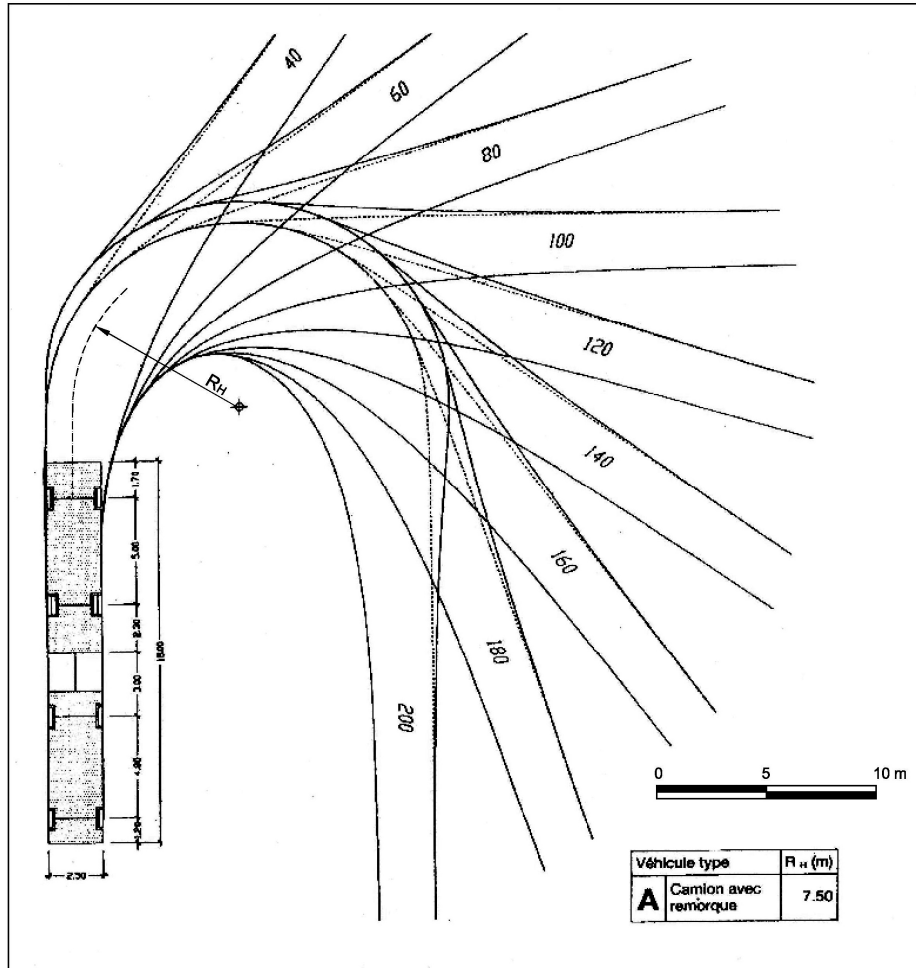
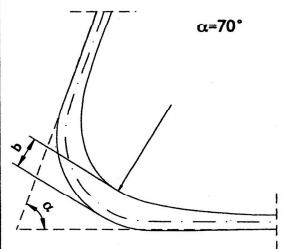
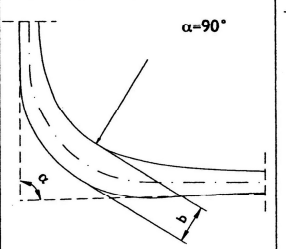
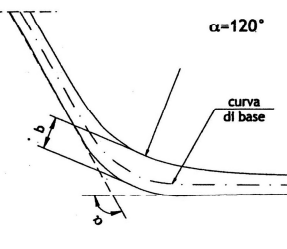


Fig. 24 – Ingombro in curva di un veicolo commerciale con rimorchio secondo le Norme Svizzere [16]

Le larghezze massime dei canali (b), in funzione del raggio del ciglio interno (R) e dell'angolo di deviazione (α), per tre tipi di mezzi pesanti possono anche ricavarsi dalla Tab. 6 [13].

Infine, una procedura molto dettagliata è riportata in [3].

Raggio R[m]	70°		90°		120°	
	Angolo α [°]	Larghezza α [m]	Angolo α [°]	Larghezza α [m]	Angolo α [°]	Larghezza α [m]
6	70°	*	70°	*	70°	*
	90°	*	90°	*	90°	*
	120°	*	120°	5.76	120°	*
8	70°	*	70°	7.00	70°	*
	90°	*	90°	6.49	90°	*
	120°	5.33	120°	5.57	120°	*
10	70°	*	70°	6.46	70°	*
	90°	*	90°	6.10	90°	*
	120°	5.15	120°	5.35	120°	4.97
15	70°	5.07	70°	5.37	70°	4.81
	90°	4.93	90°	5.22	90°	4.79
	120°	4.68	120°	4.77	120°	4.52
20	70°	4.50	70°	4.86	70°	4.32
	90°	4.41	90°	4.57	90°	4.32
	120°	4.31	120°	4.42	120°	4.17
25	70°	4.11	70°	4.25	70°	3.94
	90°	4.11	90°	4.22	90°	4.06
	120°	3.96	120°	4.15	120°	3.90
* Raggio non compatibile						
 <p style="text-align: center;">$\alpha=70^\circ$</p>		 <p style="text-align: center;">$\alpha=90^\circ$</p>		 <p style="text-align: center;">$\alpha=120^\circ$</p> <p style="text-align: right;">curva di base</p>		

Tab. 6 – Indicazioni per la costruzione delle fasce d'ingombro per veicoli tipo

7. Rotatorie

La rotatoria, come particolare configurazione di intersezione a raso, nasce agli inizi del Novecento. E' in questo periodo, infatti, che l'architetto francese Enard, nel sistemare, tra l'altro, il round-point dell'Etoile a Parigi, per una migliore organizzazione della circolazione, instaura la regola del senso unico (antiorario) lungo l'anello.

Questa regola si diffuse poi in altri Paesi, dapprima in ambito urbano per la presenza di piazze con un elemento centrale di arredo e poi su strade extraurbane.

All'aumentare del traffico questo tipo di sistemazione iniziava a mostrare i suoi limiti funzionali, principalmente a causa della regola di circolazione richiamata: i veicoli provenienti da uno dei bracci, avendo precedenza legale sul flusso circolante lungo l'anello, inducevano frequenti fenomeni di autosaturazione.

L'inconveniente non si verificava nei paesi anglosassoni dove le regole di circolazione prevedevano guida a sinistra e circolazione in senso orario lungo l'anello conservando, peraltro, la precedenza alla destra (e quindi ai flussi dell'anello).

Negli anni '50-'60, in seguito a numerosi studi sperimentali, negli USA veniva suggerito di adottare le rotatorie per domande orarie complessive non superiori a 3000 veic/h; velocità ottimali di esercizio erano ritenute 25÷40 km/h in ambito urbano e 50÷65 km/h in ambito extraurbano; per favorire le manovre di scambio alle velocità indicate si richiedevano raggi medi dell'isola centrale dell'ordine di 70÷100 m con rilevanti aumenti di costi o, spesso, con la impossibilità di configurare lo schema per mancanza di spazio. Si spiega così lo scetticismo (e spesso la preclusione) di molti tecnici nei riguardi di questo tipo di incrocio fino agli inizi degli anni Ottanta, ove si eccettui, per quanto detto, la Gran Bretagna. Decisione innovativa è risultata, a questo punto, la modifica della regola di circolazione con la quale si è attribuita la priorità al flusso circolante sull'anello rispetto ai veicoli che giungono all'incrocio.

Si è ottenuto in tal modo un aumento della capacità complessiva dell'intersezione, pur riducendone le dimensioni, cui si aggiungeva un aumento di sicurezza in considerazione di una riduzione delle velocità. La nuova regola di circolazione va esplicitamente ed efficacemente segnalata agli utenti, ed infatti la definizione di rotatoria (mutuata dalla Normativa Francese) oggi condivisa è la seguente:

“La rotatoria è un incrocio costituito da un'area centrale circondata da un anello (carreggiata) percorribile a senso unico antiorario dal traffico proveniente

da più entrate, annunciato da specifiche indicazioni segnaletiche. Queste ultime per indicare agli utenti l'immissione in una particolare intersezione dove vige la regola di precedenza dei veicoli che percorrono l'anello, qualunque sia il tipo di strada da cui provengono”.

Per i motivi sopra detti, a partire dagli anni Ottanta, sono state realizzate moltissime rotonde in numerosi Paesi (oltre che in Inghilterra, in Francia, Germania, Paesi Bassi e Paesi Scandinavi) e sono stati eseguiti in gran numero studi sia teorici che sperimentali.

In Italia la diffusione di questo schema è avvenuta con un certo ritardo, ma, attualmente, ci si è orientati a riconoscere anche da noi i vantaggi di questo incrocio che va rapidamente diffondendosi.

7.1. Considerazioni generali sulle rotonde

Fino agli anni Ottanta il funzionamento di una rotonda è stato visto come successione di zone di scambio fra due accessi adiacenti (Fig. 25).

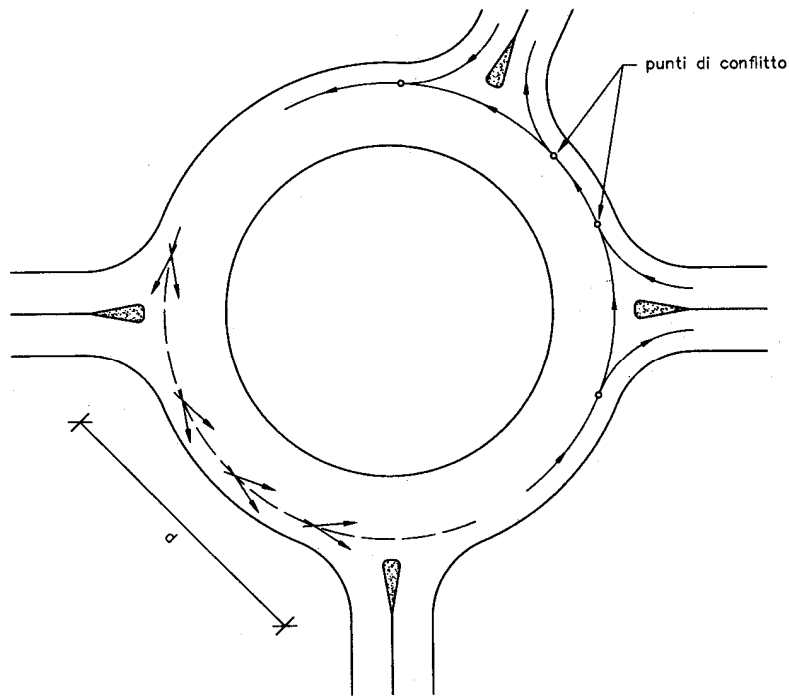


Fig. 25 – Schema di funzionamento di una rotonda come successione di zone di scambio (prima della regola di precedenza) e come successione di incroci a T

La velocità lungo queste zone, ossia lungo l'anello, commisurata alla velocità delle strade confluenti, richiedeva lunghezze delle zone di intreccio spesso elevate e, di conseguenza, raggi dell'isola centrale anche di 100 m. Ad es. l'A.A.S.H.O. (American Association of State Highways Official) suggeriva, in funzione della maggiore tra le velocità sulle strade di accesso V_b , la corrispondente velocità lungo l'anello V_a e la distanza minima d tra due vie successive appresso indicate.

V_b (km/h)	50	65	80	95
V_a (km/h)	40	50	55	65
d (m)	46	57	65	75

La modifica della regola di circolazione ha consentito di interpretare il funzionamento, pur in presenza di manovre di scambio, come successione di particolari intersezioni a T con precedenza all'anello; risulta quindi, in corrispondenza di ogni braccio, un punto di conflitto di diversione ed un punto di conflitto di immissione; appare evidente la differenza in termini di numero e tipo di punti di conflitto con l'intersezione a quattro bracci di tipo lineare (Fig. 3).

Si è constatato, peraltro, che una riduzione delle dimensioni dell'isola centrale e, quindi, delle velocità, mentre comporta diminuzioni di costi ed aumento di sicurezza, lascia pressoché immutata la capacità, per cui l'orientamento attuale è quello di non superare valori di 15÷20 m per il raggio dell'isola.

I principali vantaggi che possono conseguirsi con la risoluzione a rotatoria di un incrocio sono:

- facilitazione delle svolte e riduzione globale dei tempi di attesa che sono equilibrati per le diverse correnti non esistendo gerarchia tra i flussi;
- migliore gestione delle fluttuazioni di traffico rispetto ad incroci semaforizzati a tempo fisso per i quali il ciclo è progettato per l'ora di punta;
- aumento, in generale, del livello di sicurezza;
- efficace connessione da itinerari extraurbani veloci a zone suburbane e poi urbane;
- possibilità di inversione di marcia senza manovre pericolose o illegali;
- riduzione di inquinamento atmosferico ed acustico;
- duttilità e facilità di inserimento urbano dove molte piazze già prefigurano lo schema a rotatoria.

Esistono, tuttavia, controindicazioni all'adozione della rotatoria nei seguenti casi:

- mancanza assoluta di spazio;
- flussi fortemente squilibrati (in questi casi la regolazione semaforica può risultare più funzionale);
- quando non si vuole penalizzare, con notevoli riduzioni di velocità, la corrente principale;
- in presenza di mezzi pubblici;
- con la contemporanea presenza di mezzi pesanti e di veicoli a due ruote lo schema a rotatoria si è rivelato notevolmente pericoloso;
- i flussi perdonali sono sfavoriti poiché risultano incrementati i loro percorsi.

In ogni caso gli innegabili vantaggi hanno spinto i tecnici ad adottare le rotatorie anche in presenza di spazi limitati; sono state quindi proposte soluzioni tipicamente urbane denominate ad isola semicontrollata e minirotatorie in cui il raggio dell'isola centrale si riduce fino a 1,50÷3,00 m.

7.2. Configurazione geometrica delle rotatorie

Nella Fig. 26 sono indicati gli elementi che individuano la geometria della rotatoria. Per alcuni di essi si riporta di seguito, in base alle indicazioni prevalenti della letteratura tecnica internazionale, il campo di variazione in cui sono più frequentemente compresi, mentre per altri si indicano i valori minimi con l'intesa che, principalmente in ambito urbano, in parecchi casi è necessario adottare valori diversi.

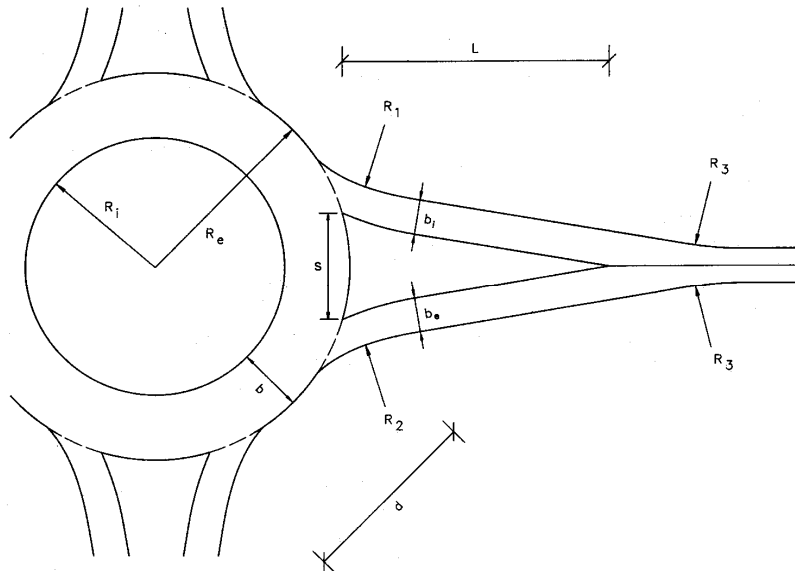


Fig. 26 – Elementi geometrici di una rotatoria

- Raggio dell'isola interna R_i : si ribadisce quanto detto in precedenza a proposito della forma, che deve essere il più vicino possibile a quella circolare, e che sono in ogni caso sconsigliate quelle ovoidali allungate. Seguendo gli orientamenti più recenti si suggeriscono i seguenti valori:
 - rotatorie extraurbane $15 \leq R_i \leq 20$ (m)
 - rotatorie urbane $8 \leq R_i \leq 15$ (m)
 - isole semicontrollate $3 \leq R_i \leq 5$ (m)
 - minirotatorie $1 \leq R_i \leq 2,5$ (m)
- Raggio medio esterno R_e : è pari al raggio interno aumentato della larghezza dell'anello.
- Larghezza dell'anello b : per b vengono suggeriti valori compresi fra un minimo di 7,00 m ed un massimo di 12,00 m; non è opportuno superare questo valore poiché i veicoli si disporrebbero su troppe file aumentando le interferenze. Se la domanda fra due bracci consecutivi è elevata, piuttosto che aumentare la larghezza dell'anello solo in un tratto si adotta la soluzione indicata nella Fig. 27.
- Larghezza dell'ingresso b_i : per una sola fila si assume $b_i = 3,50$ m o, meglio, $b_i = 4,00$ m; con due file $b_i = 7,00$ m.
- Larghezza di uscita b_e : la larghezza consigliata e più frequentemente adottata è compresa tra 4,50 e 5,00 m.

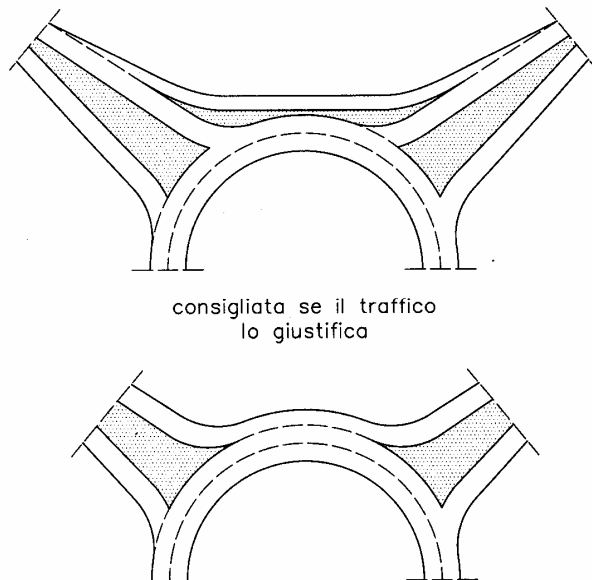


Fig. 27 – Bretella tra due rami successivi in caso di elevata domanda tra gli stessi

- Raggi R_1 e R_2 : sono i raggi di curvatura dei bordi in corrispondenza, rispettivamente, delle entrate e delle uscite. Valori minimi per R_1 sono compresi fra 15 e 20 m, mentre per R_2 sono opportuni valori un po' più grandi (25÷35 m). I raggi R_3 delle curve di raccordo dove comincia l'allargamento sono dell'ordine di 200÷300 m.
- Distanza d: la distanza d tra un ingresso e l'uscita successiva, misurata tra i vertici delle aiuole sui bracci dovrebbe essere non minore di 20÷30 m.
- Isola spartitraffico sui bracci: particolare cura deve essere dedicata alla definizione di questi elementi la cui larghezza s ha notevole influenza sulla capacità del braccio. Le dimensioni dipendono dalla velocità del ramo di accesso e dal tipo di rotonda: si passa quindi per la larghezza s da valori minimi di 1,00÷2,50 m per le minirotatorie o per quelle a isola semicontrollata, a valori compresi tra 4,00 e 12,00 m per le rotonde di maggiore dimensioni; la lunghezza L è di norma pari a 5s.

	$D_{ext} = 2 R_e$ [m]
MINI-ROTATORIE	14 ÷ 25
ROTATORIE COMPATTE	25 ÷ 40
ROTATORIE CONVENZIONALI	> 40 ÷ 50
INTERSEZIONI CON CIRCOLAZIONE A ROTATORIA (GRANDI ROTATORIE)	> 50

Tab. 7 – Classificazione delle rotonde secondo le Norme italiane [12]

Elemento modulare	$D_{ext} = 2 R_e$ [m]	Larghezza corsie [m]
Corsie nella corona giratoria (*), per ingressi ad una corsia	≥ 40	6,00
	compreso tra 25 e 40	7,00
	compreso tra 14 e 25	7,00÷8,00
Corsie nella corona giratoria (**), per ingressi a più corsie	≥ 40	9,00
	< 40	8,50÷9,00
Bracci di ingresso (**)		3,50 per una corsia 6,00 per due corsie
Bracci di uscita (*)	< 25	4,00
	≥ 25	4,50

(*) deve essere organizzata sempre su una sola corsia.

(**) organizzati al massimo con due corsie.

Tab. 8 – Larghezze degli elementi modulari delle rotonde secondo le Norme italiane [12]

	INDICAZIONI ITALIANE $D_{ext} = 2 R_c$ [m]	INDICAZIONI TEDESCHE $D_{ext} = 2 R_c$ [m]	
MINIROTORIE	14 ÷ 25	13 ÷ 25	
ROTATORIE COMPATTE	25 ÷ 40	26 ÷ 60	urbane: 26 ÷ 35 – anello 1 corsia extraurbane: 26 (meglio 30) ÷ 45 – anello 1 corsia
			urbane ed extraurbane: 40 ÷ 60 – anello 2 corsie
ROTATORIE CONVENZIONALI	40 ÷ 50	-	
INTERSEZIONI CON CIRCOLAZIONE A ROTATORIA (GRANDI ROTATORIE)	> 50	55 ÷ 80	
	INDICAZIONI ITALIANE	INDICAZIONI TEDESCHE	
Larghezza anello (b)	6 ÷ 9	4,5 ÷ 10	

Tab. 9 – Confronto tra indicazioni italiane e tedesche in tema di incroci a rotatoria

Le venti Norme italiane sulle intersezioni stradali [12] prescrivono per le rotatorie (cfr.Fig. 26) la nomenclatura della Tab. 7 e le larghezze degli elementi modulari riportate nella Tab. 8.

Nella Tab. 9 è consegnato un confronto tra indicazioni italiane e tedesche in tema di incroci a rotatoria. Da esso si evince come, a parità di nomenclatura, non vi sia coincidenza tra gli standard geometrici adottati nei due paesi.

Sempre in base alle venti Norme [12], un ulteriore elemento distintivo tra i tipi di incroci circolari di Tab. 7 “è rappresentato dalla sistemazione dell’isola centrale, che può essere resa in parte transitabile per le manovre dei veicoli pesanti, nel caso di mini-rotatorie con diametro esterno compreso fra 25 e 18 m, mentre lo diventa completamente per quelle con diametro compreso fra 18 e 14 m; le rotatorie compatte sono invece caratterizzate da bordure non sormontabili dell’isola centrale”.

In base alla matrice delle possibili connessioni riportata in Fig. 1, ancora secondo le Norme italiane, in ambito extraurbano l’adozione di mini-rotatorie è limitata agli incroci di tipo F/F tra strade locali, mentre gli schemi circolari compatti sono permessi per gli incroci tra assi C/C e C/F.

Si è detto che, fra gli altri vantaggi delle rotatorie vi è l’aumento di sicurezza che deriva dalle basse velocità con cui viene percorso l’anello; affinché ciò accada è necessaria una organizzazione della geometria che escluda traiettorie

“tangenti” a piccola curvatura. L’obiettivo si raggiunge costruendo, per ciascun braccio, la traiettoria di deflessione, ovvero l’angolo di deviazione β ; la prima [14] è una traiettoria convenzionale, formata da tre archi di circonferenza, la cui costruzione è chiaramente indicata in Fig. 28.

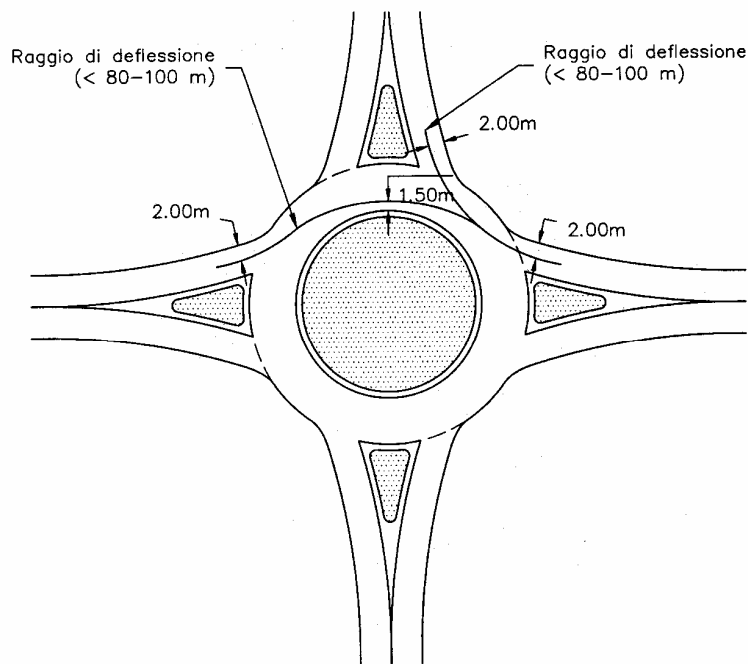


Fig. 28 – Traiettoria di deflessione della rotatoria

Per determinare l’angolo di deviazione β , seguendo le indicazioni contenute in [12] e facendo riferimento alla Fig. 29, si tracciano gli archi di cerchio di raggio R_1+b_1 e R_2+b_2 e quindi le tangenti a questi archi di cerchio ed all’isola centrale; si individua così l’angolo di deviazione β che dovrebbe essere non inferiore a 45° . Va detto comunque che quando l’isola centrale ha diametro inferiore a $6\div 8$ m le condizioni richieste per la traiettoria di deflessione e per l’angolo di deviazione non possono essere rispettate.

Nella Fig. 30 è indicata la sezione trasversale di una rotatoria: si nota che la pendenza per lo smaltimento dell’acqua piovana è rivolta verso l’esterno, il che è sfavorevole per i veicoli che percorrono l’anello, mentre favoriti sono quelli in uscita. Si accetta di norma tale configurazione perché, oltre che, come appena detto, vantaggiosa per l’allontanamento delle acque dalla piattaforma, essa risulta costruttivamente migliore nei riguardi del raccordo delle falde in

corrispondenza dei rami che si innestano sull'anello. Solo nel caso di anelli molto larghi può prevedersi una sagoma a doppia falda che presenta però gli inconvenienti anzi detti.

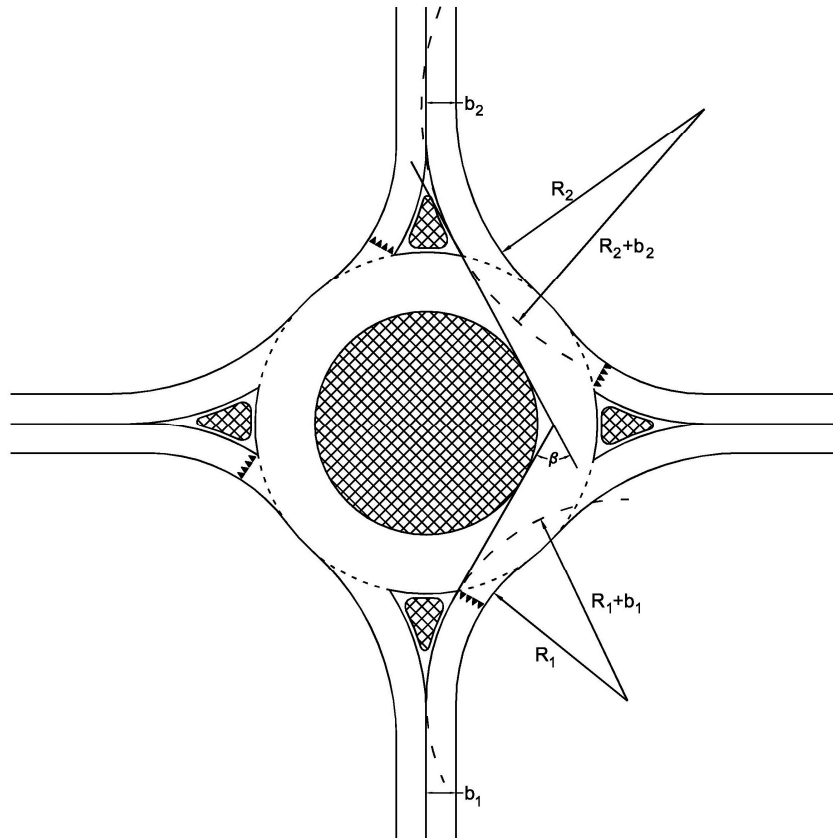


Fig. 29 – Determinazione dell'angolo di deviazione β

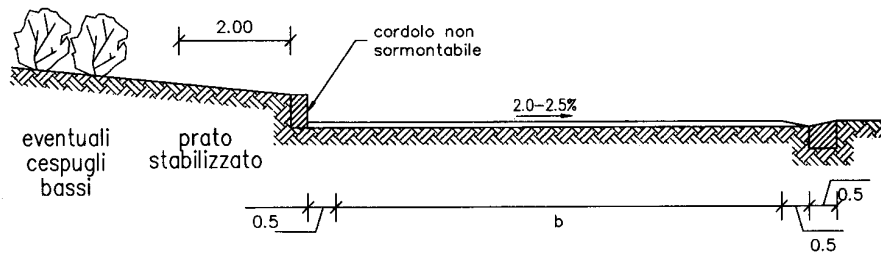


Fig. 30 – Sezione trasversale di una rotatoria

La Fig. 31 mostra la sezione trasversale di una rotatoria ad isola semicontrollata ($R_i \leq 5,00$ m): la corona centrale serve per favorire la svolta dei mezzi pubblici e dei grossi autocarri; deve essere delimitata da un cordolo facilmente sormontabile e pavimentata in modo diverso per indicare, anche visivamente, che deve essere transitata solo dai veicoli di grosse dimensioni e non dalle vetture e dai mezzi a due e tre ruote.

Infine la Fig. 32 mostra la costruzione del triangolo di visibilità con la zona da tenere sgombra da ostacoli di altezza superiore ad 1,00 m.

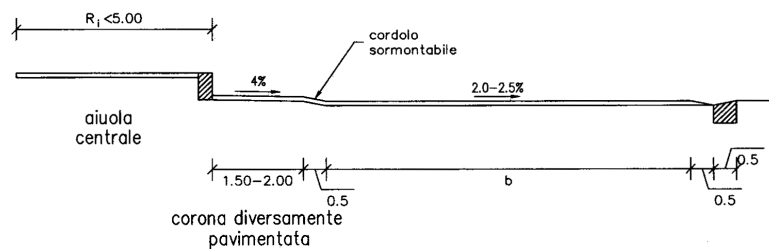


Fig. 31 – Sezione trasversale di una rotatoria ad isola semicontrollata con piccolo raggio dell'isola centrale

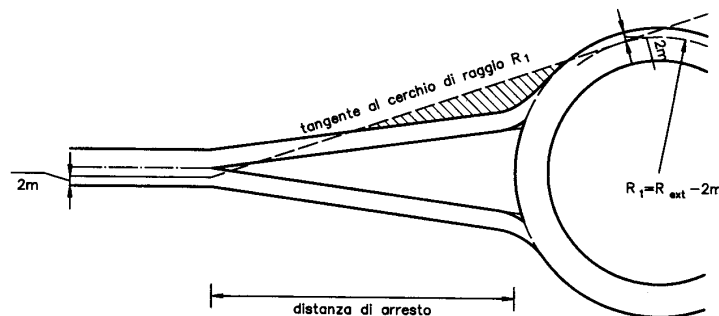


Fig. 32 – Costruzione del triangolo di visibilità

Si richiama infine l'attenzione sul ruolo che il corretto mutuo posizionamento tra i bracci e l'anello riveste per la sicurezza dell'esercizio di una rotatoria. In particolare, per quanto attiene alla ripartizione dei bracci sull'anello, sono da evitare configurazioni che favoriscono la concentrazione dei flussi su parti limitate dell'anello (cfr. Fig. 33a). Per quanto attiene alla posizione dei bracci rispetto all'isola centrale (cfr. Fig. 33b), essi devono convergere verso il centro dello schema (in linea di principio vanno evitate le traiettorie tangenziali); dovendo tollerare una eccentricità, essa deve trovarsi dal lato dell'uscita.

Sono inoltre sconsigliati gli accessi con lunghi rettili, cosicché è opportuno introdurre curve e controcurve per ridurre la velocità (cfr. Fig. 34).

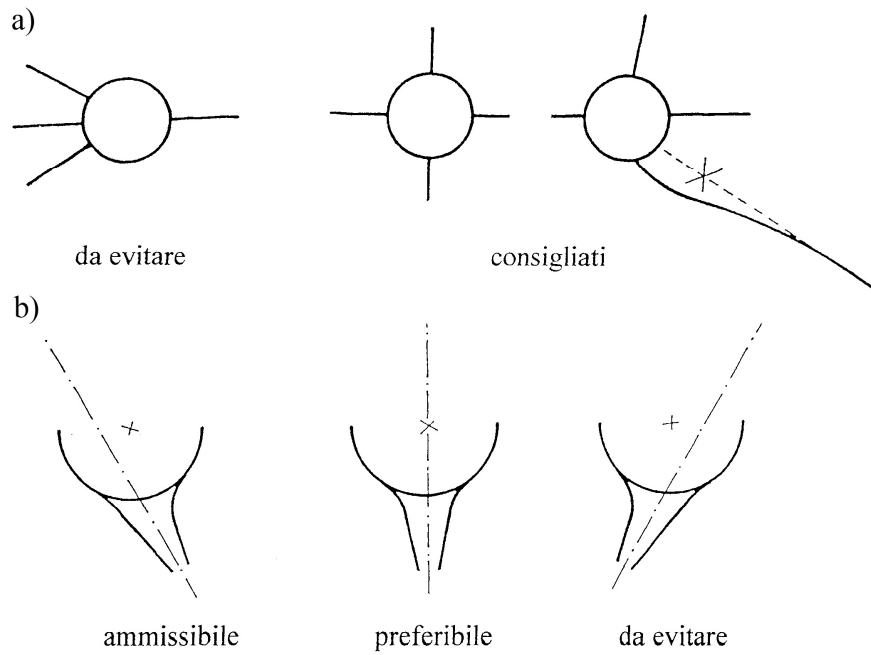


Fig. 33 – Mutuo posizionamento dei bracci e dell'anello

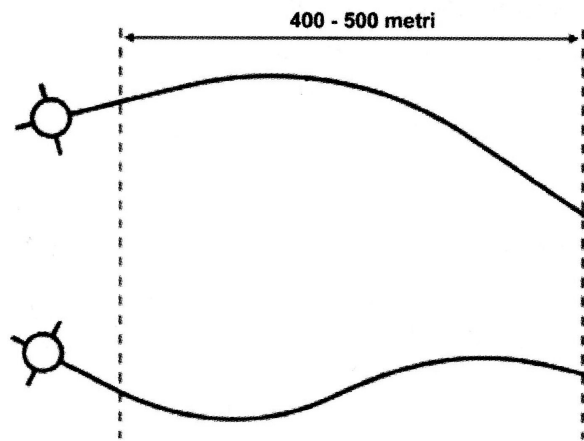


Fig. 34 – Un esempio di profilatura dei rami di ingresso in rotatoria

8. Intersezioni semaforizzate

Queste intersezioni dal punto di vista della geometria non presentano differenze apprezzabili rispetto a quelle di tipo lineare e quindi ci si può senz'altro rifare a quanto detto al §6 tenendo, ovviamente, presente che, in generale, tutte le correnti di traffico vengono a fasi alterne arrestate. Gli aspetti funzionali (determinazione del ciclo e valutazione dei ritardi) sono trattati in [4].

9. Intersezioni altimetricamente sfalsate

Intersezione altimetricamente sfalsata è quella in cui due strade si incrociano a quote differenti e sono connesse fra loro da brevi tronchi di strada (denominati usualmente rampe) che consentono il passaggio dei veicoli da una strada all'altra. E' necessario pertanto almeno un'opera di scavalco. Tra il piano viabile sottostante e l'intradosso della struttura sovrastante deve esservi in ogni punto una distanza non minore di 5,00 m (cfr. anche le Figg. 14 e 15 del Cap.9 di [5]); la differenza di quota tra le due strade dipende quindi dalla luce e dalla tipologia del manufatto che realizza l'attraversamento, ma è, nella maggior parte dei casi, compresa fra 6,00 e 7,00 m.

Con lo sfalsamento dei livelli si consegue sempre l'eliminazione dei punti di conflitto di attraversamento tra le correnti in transito, mentre gli altri possono essere eliminati in parte o del tutto (si parla in tal caso di svincolo) a seconda della tipologia che si adotta: questa dipende dal numero e dal tipo di rampe, nonché dalla loro collocazione.

Ricordando quanto detto al § 2, questo tipo di intersezione è obbligatoria per le connessioni (Fig. 1) A/A; A/B; A/D; A/C; A/E; B/B; B/C; B/D; B/E; D/D; D/C; D/E anche se non va escluso a priori lo sfalsamento anche tra strade extraurbane secondarie ove si tengano presenti le considerazioni che seguono:

- con lo sfalsamento le velocità delle correnti in transito di una o di ambedue le strade restano pressoché invariate; lo stesso dicasi per la qualità della circolazione (Livello di Servizio) e per la capacità;
- le manovre di svolta, o almeno alcune di esse, avvengono senza arresti o rallentamenti eccessivi, essendo costituite solo da manovre di diversione e di immissione;
- la eliminazione parziale o totale dei punti di conflitto comporta un aumento di sicurezza.

Per contro va tenuto presente che:

- l'incrocio a livelli sfalsati è più costoso per la presenza di una o più opere di scavalco, delle rampe e dello spazio occupato;

- la differenza di quota richiesta comporta variazioni del profilo altimetrico di almeno una delle due strade con conseguente aumento dei costi; peraltro se le due strade si sviluppano già a quote differenti, la soluzione a livelli sfalsati con una o due rampe potrebbe risultare concorrenziale, se non più conveniente;
- l'incrocio sfalsato ha un maggiore impatto visivo rispetto a quelli a raso, ma sembra preferibile nei riguardi dell'inquinamento atmosferico ed acustico.

Tutto quanto sopra esposto induce ad affermare che almeno in alcuni casi - in particolare per le connessioni C/C, D/E ed anche D/D - la scelta non può derivare esclusivamente da una Norma: particolari situazioni locali, entità dei flussi in transito ed in svolta, incidentalità superiore alla media (per intersezioni esistenti) possono indirizzare verso soluzioni non in linea con la Norma; è auspicabile che sia lasciata al progettista la facoltà di optare, con le necessarie giustificazioni, per la soluzione globalmente più idonea.

9.1. Le rampe di connessione

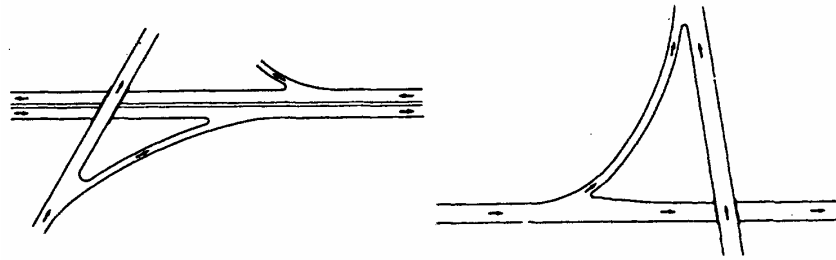
Le rampe che collegano le due strade, pur nella varietà di forma derivante dalla necessità di adattarsi a situazioni locali, sono sempre riconducibili a tre tipi fondamentali (Fig. 35):

- rampa diretta, che consente la svolta a destra o a sinistra nel modo più naturale e con il percorso più breve; va detto che l'uso di questa rampa per la svolta a sinistra implica l'uscita e l'immissione in sinistra delle carreggiate, nonché lo scavalco della carreggiata di senso opposto ed, eventualmente, di altre rampe;
- rampa semidiretta, che consente l'uscita sul lato destro della carreggiata con curva a destra che si trasforma gradualmente in curva a sinistra;
- rampa indiretta o a cappio, che converte la svolta a sinistra in svolta a destra con angolo al centro prossimo a $3/2\pi$; non taglia nessuna corrente di traffico, ma risulta poco intuitiva e presenta un percorso maggiore rispetto agli altri due tipi.

Le rampe possono essere monodirezionali (ad una o due corsie) o bidirezionali. Le dimensioni degli elementi della piattaforma sono determinate in funzione della strada di livello gerarchico superiore tra quelle confluenti nel nodo e sono riportate nella Tab. 10 integralmente tratta da [12]; per quanto riguarda gli elementi marginali si farà riferimento a quanto riportato al §9.2 di [5].

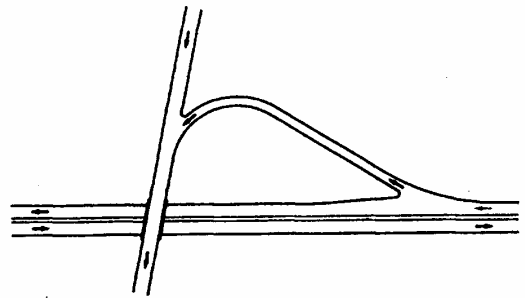
Le caratteristiche planoaltimetriche derivano, come sempre, dalla velocità: anche se alcuni suggeriscono valori intorno al 60÷70% delle velocità delle strade che si intersecano, va detto che ciò è possibile per le rampe dirette,

mentre, soprattutto per quelle a cappio, è opportuno riferirsi a velocità minori, non solo per motivi di costo, ma anche perché l'allungamento dei percorsi vanificherebbe i vantaggi di una velocità elevata.

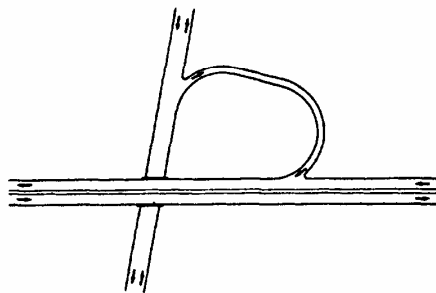


Rampa diretta per la svolta a destra

Rampa diretta per la svolta a sinistra



Rampa semidiretta



Rampa a cappio

Fig. 35 – Tipi di rampe

Strade extraurbane				
Elemento modulare	Tipo di strada principale	Larghezza corsie (m)	Larghezza banchina in destra (m)	Larghezza banchina in sinistra (m)
Corsie specializzate di uscita e di immissione	A	3,75	2,50	-
	B	3,75	1,75	-
Rampe monodirezionali	A	1 corsia: 4,00	1,00	1,00
		2 corsie: 2 x 3,50		
	B	1 corsia: 4,00	1,00	1,00
		2 corsie: 2 x 3,50		
Rampe bidirezionali	A	1 corsia: 3,50	1,00	-
	B	1 corsia: 3,50	1,00	-

Strade urbane				
Elemento modulare	Tipo di strada principale	Larghezza corsie (m)	Larghezza banchina in destra (m)	Larghezza banchina in sinistra (m)
Corsie specializzate di uscita e di immissione	A	3,75	2,50	-
	D	3,25	1,00	-
Rampe monodirezionali	A	1 corsia: 4,00	1,00	1,00
		2 corsie: 2 x 3,50		
	D	1 corsia: 4,00	1,00	1,00
		2 corsie: 2 x 3,50		
Rampe bidirezionali	A	1 corsia: 3,50	1,00	-
	D	1 corsia: 3,50	1,00	-

Tab. 10 – Dimensioni degli elementi della piattaforma delle rampe [12]

Nella Tab. 11 sono contenute, in base alla Norma italiana [12], le velocità di progetto per i tipi di rampe in base alle categorie di strade che si intersecano, mentre nella Tab. 12 sono riportati i valori minimi delle caratteristiche geometriche in funzione delle predette velocità.

Tipi di rampe \ Incroci	A/A; A/B; A/D		A/C, A/E; B/B; B/C; B/D; B/E; D/C; D/D; D/E	
	Diretta	50÷80 km/h		40÷60 km/h
Semidiretta	40÷70 km/h		40÷60 km/h	
Indiretta (cappio)	in uscita da A	40÷70 km/h	in uscita dalla strada di livello ger. superiore	40÷60 km/h
	in entrata su A	30÷70 km/h	in entrata sulla strada di livello ger. superiore	30÷60 km/h

Tab. 11 - Velocità di progetto per i tipi di rampe in base alle categorie di strade che si intersecano

Velocità di progetto (km/h)		30	40	50	60	70	80
Raggio planimetrico minimo (m)		25	45	75	120	180	250
Pendenza longitudinale massima (%)	Salita	10	7	7	5	5	5
	Discesa	10	8	8	6	6	6
Raccordi verticali R_{min} (m)	Convessi	500	1000	1500	2000	2800	4000
	Concavi	250	500	750	1000	1400	2000
Pendenza trasversale (%)	Minima	2,5					
	Massima	7					
Distanza di visuale libera minima (m)		25	35	50	70	90	115

Tab. 12 - Caratteristiche plano-altimetriche delle rampe

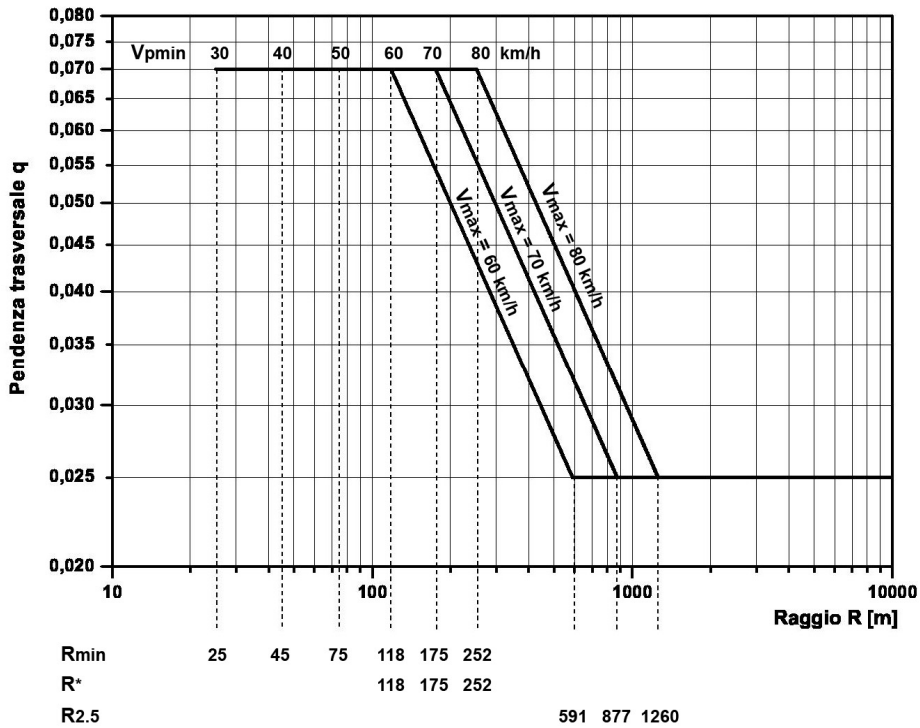


Fig. 36 – Abaco per il calcolo del raggio delle curve circolari delle rampe

Va notato che, anche se risulterebbe opportuno adottare, anche per le curve circolari di raggio minimo, una pendenza trasversale in curva di valore contenuto - sia per le inversioni di curvatura che caratterizzano alcune rampe, sia per facilitare i raccordi delle falde agli innesti delle rampe stesse sulle strade - in base alla Norma [12] detti raggi minimi risultano comunque quelli relativi

ad una pendenza trasversale (massima) del 7%; inoltre, sempre in base a [12], la pendenza trasversale di curve circolari di raggio superiore a quelli indicati in Tab. 12 va definita in base alle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” (D.M. 5/11/2001). In questa direzione, può consultarsi, per il calcolo, il §7.2 di [5]. In Fig. 36 è rappresentato un abaco che traduce graficamente le relazioni tra R , q e V che si traggono dalle indicazioni delle Norme richiamate.

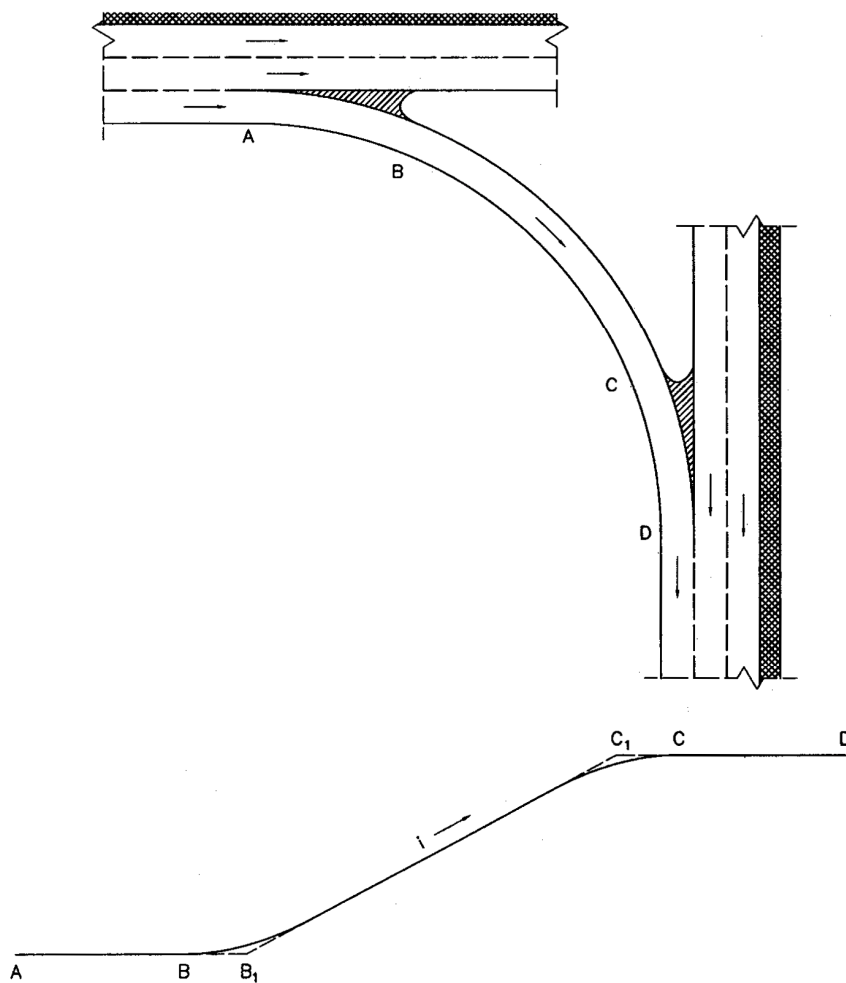


Fig. 37 – Planimetria e profilo di una rampa

È desiderabile, inoltre, sempre che sia possibile, non raggiungere i valori massimi di pendenza longitudinale, sia per motivi di sicurezza, sia perché aumentano le lunghezze dei raccordi verticali riducendo la lunghezza utile per il superamento del dislivello; ciò è illustrato nella Fig. 37, ove sono schematicamente riportati la planimetria ed il profilo longitudinale di una rampa. La linea A-B-C-D rappresenta il bordo della carreggiata della rampa cui va riferito il profilo; è opportuno che i tratti A-B e C-D non presentino variazione di quota rispetto alle strade e, quindi, i raccordi verticali debbono svilupparsi nel tratto B-C, per cui la pendenza della rampa va determinata con riferimento alla lunghezza B_1-C_1 .

Per la completa definizione planimetrica delle rampe la Norma [12], con riferimento alla adozione delle curve di transito, prevede che “per l’inserimento delle curve a raggio variabile (clotoidi) va fatto riferimento ai criteri contenuti nel D.M. 5/11/2001. Per i tratti di decelerazione delle uscite ad ago, e nei casi in cui il tronco di accelerazione nelle immissioni si sviluppi parzialmente con un elemento a curvatura variabile, il progettista dovrà scegliere opportunamente una curva a raggio variabile, anche composita, prescindendo dalle indicazioni del citato D.M.”.

Infine, le Norme [12] indicano esplicitamente che lungo le rampe debbano essere soddisfatte le verifiche di visibilità in base a quanto stabilito dalle già richiamate “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” (D.M. 5/11/2001); anche in questo caso può consultarsi, per il calcolo, il §10.2 di [5].

9.2. Corsie di uscita e di immissione

Della funzione di queste corsie specializzate si è già detto al §6.1.2 e al §6.1.3. vanno tuttavia indicate le variazioni relative agli incroci sfalsati. Le larghezze delle corsie e delle banchine, secondo le norme italiane [12], sono riportate nella Tab. 10.

9.2.1. Corsie di uscita (decelerazione)

Un tipico esempio di corsia di decelerazione è riportato in Fig. 38 ove si osserva che al tronco di manovra segue quello di decelerazione che è in parte parallelo ed in parte curvilineo costituito dall’arco di clotoide che raccorda il tratto parallelo con il tratto circolare della rampa; la costruzione geometrica è fatta con riferimento al bordo della carreggiata.

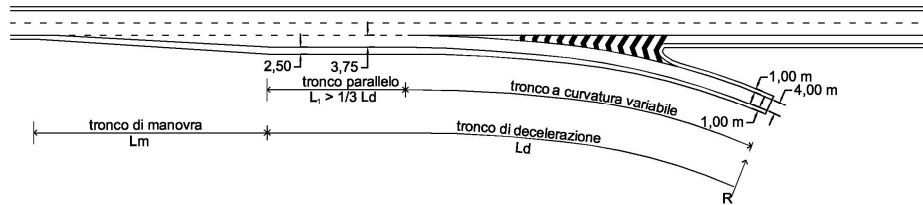


Fig. 38 – Corsia di uscita

La lunghezza del tronco di manovra L_m può fissarsi variare da 40 m per $V_p = 60$ km/h a 90 m per $V_p \geq 120$ km/h.

La lunghezza del tronco di decelerazione si calcola, come tratto da percorrere in moto uniformemente decelerato, con la (1): per v_c si assume la velocità di progetto della strada in quel punto; per v_R la velocità determinata dal raggio della rampa; la decelerazione viene in genere assunta dell'ordine dei $2 \div 3$ m/s², a seconda del tipo di strada, come subito si dirà nel seguito illustrando il dettato delle [12].

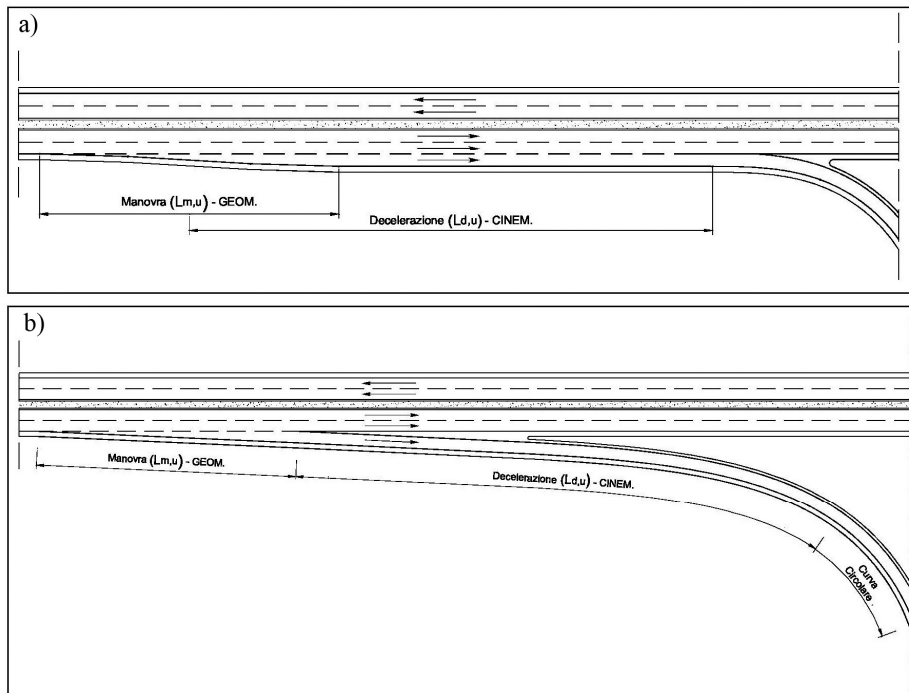


Fig. 39 – Possibili configurazioni delle corsie di uscita secondo le norme italiane [12]

Con specifico riferimento, quindi, alle attuali Norme italiane [12] la configurazione delle corsie di uscita delle intersezioni altimetricamente sfalsate è identica a quella prevista per le intersezioni a raso e riportata nella Fig. 12. Per comodità del lettore, essa si riproduce nella Fig. 39.

La lunghezza $L_{m,u}$ del tronco di manovra deve essere determinata in funzione della velocità di progetto del tratto dal quale si dirama la corsia secondo quanto riportato nella Tab. 13.

V_p [km/h]	$L_{m,u}$ [m]
40	20
60	40
80	60
100	75
≥ 120	90

Tab. 13 – Determinazione della lunghezza del tratto di manovra negli incroci a livelli sfalsati [12]

La lunghezza L_d del tronco di decelerazione si calcola, con criteri cinematici, in modo identico al caso degli incroci lineari a raso (sempre con la (1) in cui per v_c si assume la velocità di progetto della strada in quel punto, per v_R la velocità determinata dal raggio della rampa, $i=0$ e $a=3,0 \text{ m/s}^2$ per le strade A e B e $a=2,0 \text{ m/s}^2$ per le altre strade).

Per quanto attiene infine alla larghezza della banchina in destra per la corsia di uscita, ancora secondo le norme italiane [12], essa va assunta in funzione del tipo di strada con i valori della Tab. 10. Dalla stessa tabella si evince come la banchina della rampa contigua è posta di ampiezza diversa (indipendentemente dal tipo di strada sempre pari ad 1 m). Si pone quindi, nel passaggio dalla corsia specializzata alla rampa il problema della transizione dall'una all'altra larghezza.

Le Norme [12] non forniscono indicazioni sulle modalità di effettuazione di detta transizione. Un criterio può essere costituito dall'utilizzare l'eventuale curva di transito tra corsia specializzata e curva circolare della rampa come elemento lungo il quale sviluppare la variazione di larghezza della banchina.

9.2.2. Corsie di immissione

Queste corsie (ancora oggi denominate anche corsie di accelerazione) si compongono di un tronco di accelerazione a curvatura variabile (clotoide) che termina all'inizio del tratto parallelo; questo viene percorso (come mostrano

numerose ricerche sperimentali), a velocità pressoché costante dell'ordine di $70 \div 80$ km/h, dai veicoli che debbono immettersi nella corrente in transito.

Una configurazione tipica è riportata in Fig. 40.

La lunghezza del tronco di accelerazione L_a viene quindi calcolata ancora con la (1) assumendo come velocità iniziale quella consentita dal raggio della rampa e come velocità finale 80 km/h. si assume per l'accelerazione un valore compreso fra $1,00$ e $1,20$ m/s^2 .

La lunghezza del tronco parallelo L_1 , che è in effetti un tronco di attesa in movimento, dipende dal volume di traffico in transito e deve essere determinata utilizzando i modelli di diversa natura ⁽⁵⁾. Su essi si dirà tra breve illustrando il dettato della Norma [12].

La lunghezza del tratto di raccordo L_m è pari a 75 m per $V_p > 80$ km/h e 50 m per $V_p \leq 80$ km/h essendo V_p la velocità di progetto della strada in cui ci si immette.

Con specifico riferimento ora alle Norme italiane [12] la configurazione delle corsie di uscita delle intersezioni almetricamente sfalsate è identica a quella prevista per le intersezioni a raso e riportata nella Fig. 53.

Per comodità del lettore essa si riproduce nella Fig. 41.

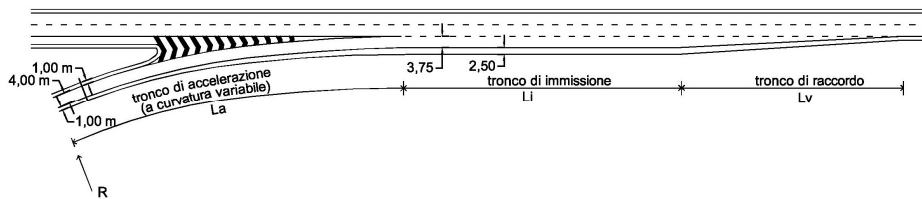


Fig. 40 – Corsia di immissione

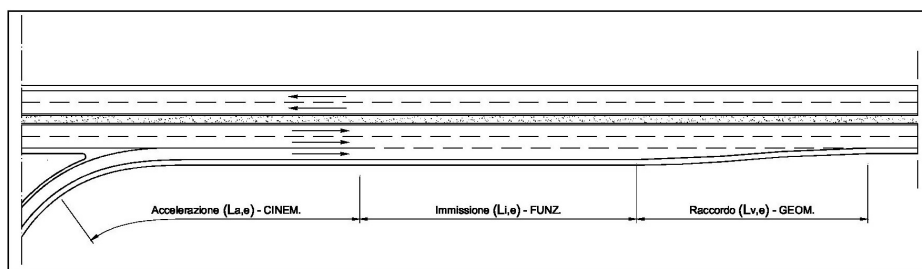


Fig. 41 – Configurazione delle corsie di immissione secondo le norme italiane [12]

⁽⁵⁾ In genere, nei momenti in cui sulla corsia 1 della strada il traffico è scarso, il veicolo proveniente dalla rampa si immette senza utilizzare quasi per niente la corsia di immissione.

In modo identico al caso delle intersezioni a raso, la lunghezza $L_{a,e}$ del tronco di accelerazione deve essere determinata con criteri cinematici (con la (1) assumendo v_c pari all'80% della velocità di progetto della strada sulla quale la corsia si immette, v_R pari alla velocità di progetto della rampa nel punto di inizio del tratto di accelerazione della corsia di entrata, $i = 0$ e $a = 1,0 \text{ m/s}^2$); la lunghezza $L_{i,e}$ del tronco di immissione va calcolcolata con criteri funzionali ("secondo procedure basate sulla distribuzione probabilistica dei distanziamenti temporali tra i veicoli in marcia, su ciascuna corsia"), e quindi utilizzando modelli mutuati dalla teoria dei fenomeni di attesa o avvalendosi della procedura contenuta nel Manuale della Capacità (cfr. Cap.3 e Cap.6 di [4]).

La lunghezza $L_{v,e}$ dell'elemento di raccordo deve essere dimensionata con criteri geometrici: in questo caso, tuttavia, diversamente dal caso degli incroci a raso, le [12] forniscono le indicazioni contenute nella Tab. 14 per il suo dimensionamento in funzione della velocità di progetto della strada sulla quale la corsia si immette.

V_p [km/h]	$L_{v,e}$ [m]
> 80	75
≤ 80	50

Tab. 14 – Determinazione della lunghezza dell'elemento di raccordo nelle corsie di immissione per incroci a livelli sfalsati [12]

Per quanto attiene infine alla larghezza della banchina in destra per la corsia di immissione, ancora secondo le norme italiane [12], essa va assunta in funzione del tipo di strada con i valori della Tab. 10. Dalla stessa tabella si evince come la banchina della rampa di ingresso è posta di ampiezza diversa (indipendentemente dal tipo di strada sempre pari ad 1 m). Si pone quindi, nel passaggio dalla rampa alla corsia specializzata il problema della transizione dall'una all'altra larghezza.

Le Norme [12] non forniscono indicazioni sulle modalità di effettuazione di detta transizione. Un criterio può essere costituito dall'utilizzare l'eventuale curva di transito tra curva circolare della rampa e corsia specializzata come elemento lungo il quale sviluppare la variazione di larghezza della banchina.

Una differente configurazione di queste corsie è stata proposta da Canale ed altri [2]. Per quanto riguarda le corsie di uscita, numerose osservazioni sperimentali evidenziano che una percentuale molto elevata di utenti non utilizza il tronco parallelo, ma segue traiettorie molto distese occupando la corsia di marcia in fase di decelerazione (Fig. 42): in considerazione di questi

diffusi comportamenti viene proposto di sostituire al tronco di manovra ed al tronco parallelo di decelerazione un unico tronco ad “ago” lungo il quale si ha una diminuzione di velocità pari circa al 15 % della iniziale velocità di progetto V_p , mentre tutta la restante decelerazione avviene sul tratto curvilineo; valori suggeriti per la lunghezza L_m , in funzione della velocità V_p , sono i seguenti.

V_p (km/h)	80	100	120	140
L_m (m)	110	140	170	200

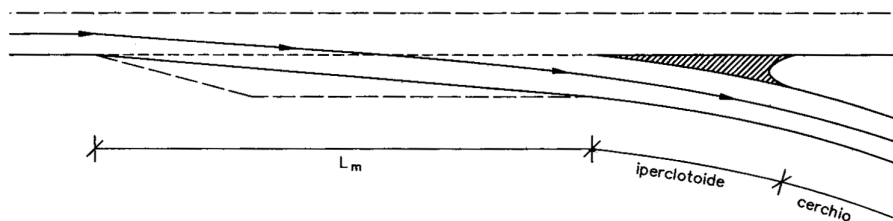


Fig. 42 – Corsia di uscita come proposta in [2]

Per il successivo tronco curvilineo si osserva che il veicolo, oltre che alla decelerazione longitudinale, è sottoposto anche ad una accelerazione trasversale per cui la traiettoria (teorica) del veicolo è una particolare curva detta curva di frenatura o curva di Blaschke che per primo la studiò e che è di non agevole trattazione analitica. Le curve di frenatura possono tuttavia essere ben approssimate da iperclotoidi di adeguato parametro n : quest'ultimo dipende dal raggio di curvatura e dalla velocità all'inizio ed alla fine della curva. In [2] sono riportate indicazioni per individuare il parametro n e per il calcolo delle coordinate cartesiane della iperclotoide.

Analoga indicazione viene data per il tronco curvilineo di accelerazione.

Benché in via di principio più corrette, alcune normative (ad es. quella svizzera) propendono per soluzioni semplici, ossia per la clotoide, anche in considerazione della larghezza delle rampe che lascia all'utente la possibilità di seguire la più opportuna traiettoria.

9.3. Tipi di intersezioni a livelli sfalsati

Il numero ed il tipo di rampe, l'occupazione di alcuni o di tutti i quadranti, il numero di opere di scavalco, la eliminazione parziale o totale dei punti di conflitto possono dar luogo ad una vasta gamma di soluzioni fra cui il progettista sceglie di volta in volta la più idonea.

Nel seguito si illustrano sinteticamente le tipologie più frequentemente usate a partire dalle più semplici ed economiche.

9.3.1. Intersezione monoquadrante o diagonale

E' caratterizzata da un unico ponte e da una sola rampa a doppio senso che consente tutte le svolte (Fig. 43). Si tratta di una soluzione minimale che elimina solo i punti di conflitto tra le correnti in transito, lasciando quelli delle svolte su ambedue le strade; non può quindi essere adottata se almeno una delle due strade è a doppia carreggiata, per cui viene utilizzata come alternativa alle intersezioni a raso quando le strade si trovano naturalmente a quote differenti e si vuole (con volumi sostenuti di traffico in transito) migliorare la sicurezza e/o l'efficienza.

Si osserva che vi sono due svolte libere (A-B e D-C), mentre, con la regola di dare precedenza ai veicoli fermi allo STOP rispetto a quelli fermi allo STOP sulla rampa, le svolte più penalizzate risultano la C-D e la B-A. Le cose mutano se la rampa è posta in un altro quadrante per cui, se vi è libertà di scelta, si posizionerà la rampa in modo da favorire le svolte più trafficate.

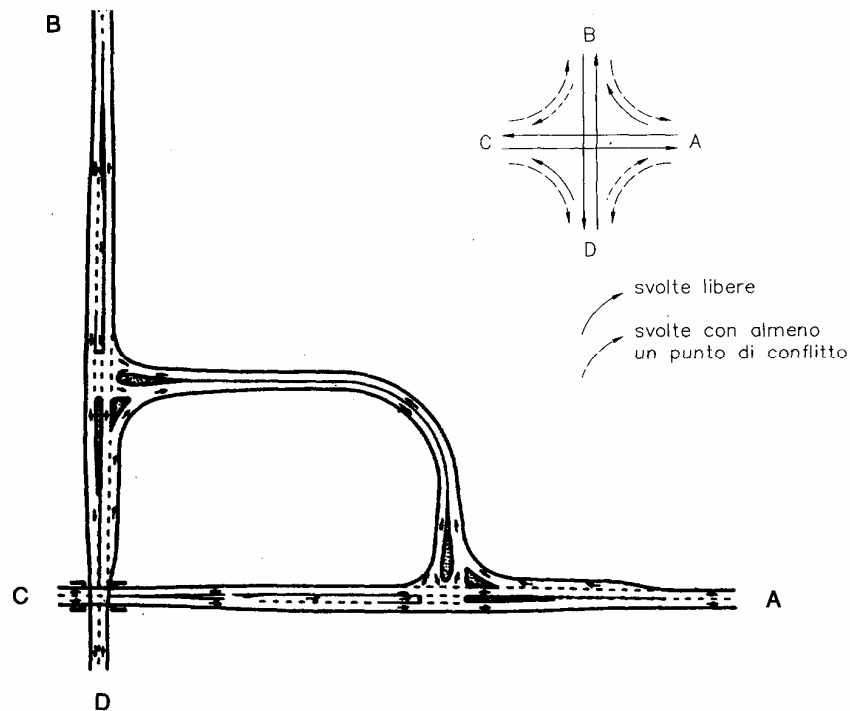


Fig. 43 – Incrocio monoquadrante o diagonale

9.3.2. Intersezioni a quadrifoglio parziale o semiquadrifoglio

Con questo tipo di incrocio, le cui rampe occupano due quadranti, è possibile eliminare tutti i punti di conflitto su una delle due strade; costituisce quindi una possibile soluzione quando una strada con spartitraffico - ad es. tipo B - interseca una strada tipo C. In Fig. 44 e Fig. 45 sono riportati due possibili schemi: nel primo le rampe sono disposte in due quadranti opposti, mentre nel secondo occupano due quadranti adiacenti. La scelta va fatta in primo luogo in base alla possibilità di posizionare o meno la rampa in un determinato quadrante e poi tenendo conto delle svolte favorite che, come risulta dagli schemi riportati nelle figure, non sono sempre le stesse.

Le rampe sono a doppio senso di marcia e ciascuna di esse, a seconda della svolta che consente, è contemporaneamente diretta, semidiretta e a cappio.

Come risulta chiaramente dalle figure all'innesto delle rampe sulla strada principale - la A-C in Fig. 44 e la D-B in Fig. 45 - vanno previste le corsie di uscita e di immissione, mentre le due connessioni con la strada secondaria sono in effetti due intersezioni a raso a T per le quali vale quanto detto in proposito al §6.

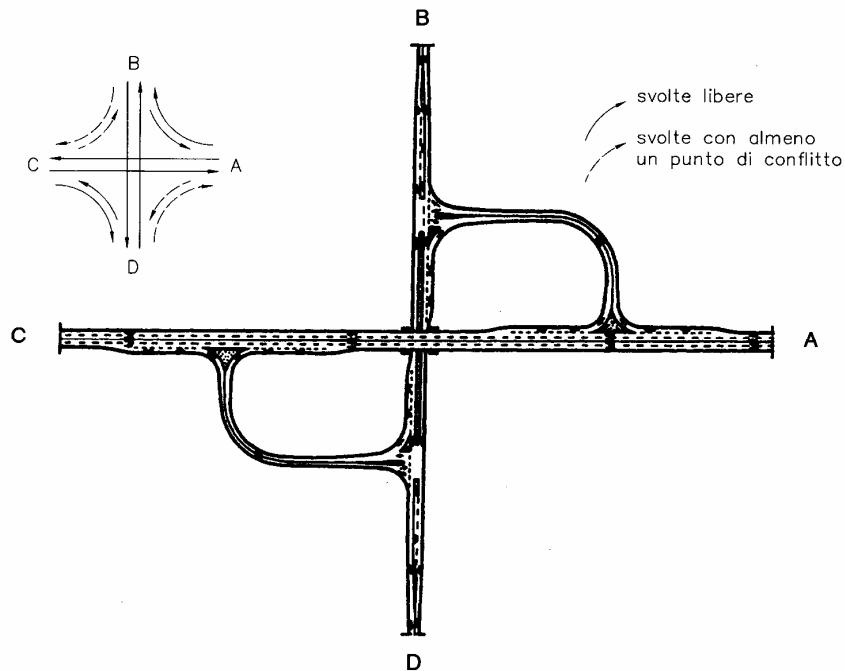


Fig. 44 – Incrocio a quadrifoglio parziale con rampe in due quadranti opposti

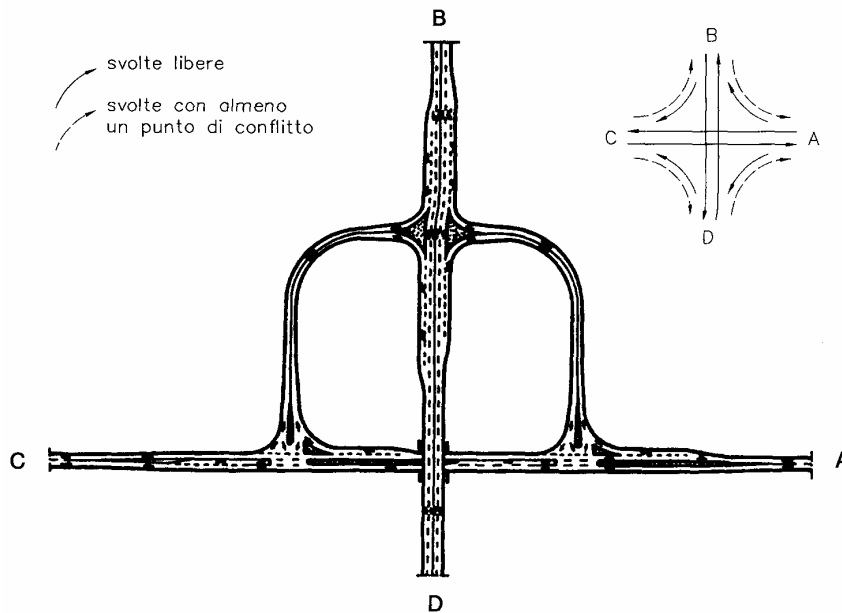


Fig. 45 – Incrocio a quadrifoglio parziale con rampe in due quadranti adiacenti

9.3.3. Incroci a rombo

L'incrocio a rombo (detto anche a diamante o olandese) è formato da quattro rampe dirette, così come indicato nella Fig. 46. E' utilizzato in alternativa al quadrifoglio parziale poiché anch'esso consente l'eliminazione dei punti di conflitto su una delle due strade ed è preferito purché sia possibile occupare i quattro quadranti; infatti le rampe, tutte a senso unico, formano con la strada principale angoli piccoli per cui le uscite e le immissioni possono avvenire a velocità sostenute, il che comporta accorciamento delle corsie di uscita e di immissione; per contro sulla strada secondaria si configurano due intersezioni a quattro bracci che, benché alcune svolte siano impedito essendo le rampe a senso unico, possono porre qualche problema in termini di attesa. L'inconveniente può essere superato con lo sfalsamento planimetrico delle rampe ottenendo così lo schema riportato in Fig. 47. Si hanno in tal modo quattro svolte libere e quattro con un unico punto di conflitto di attraversamento.

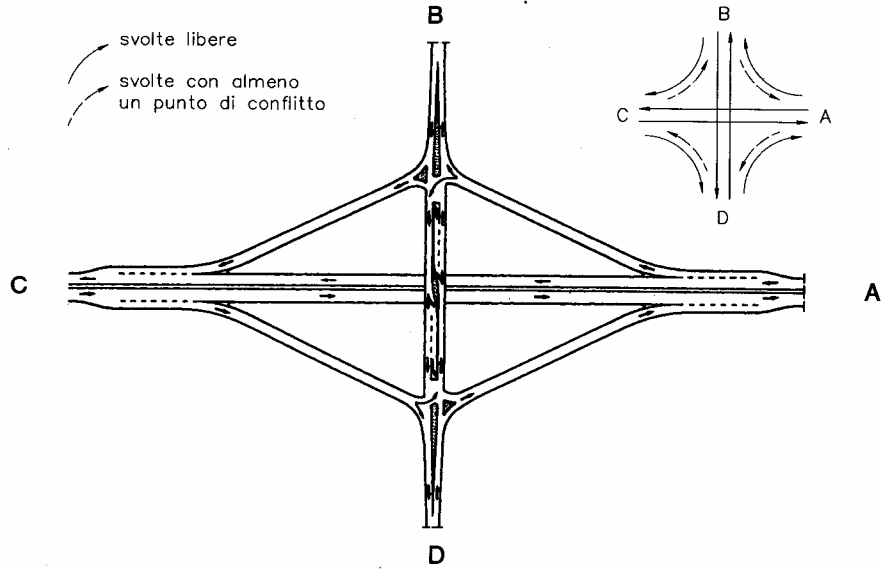


Fig. 46 – Incrocio a rombo

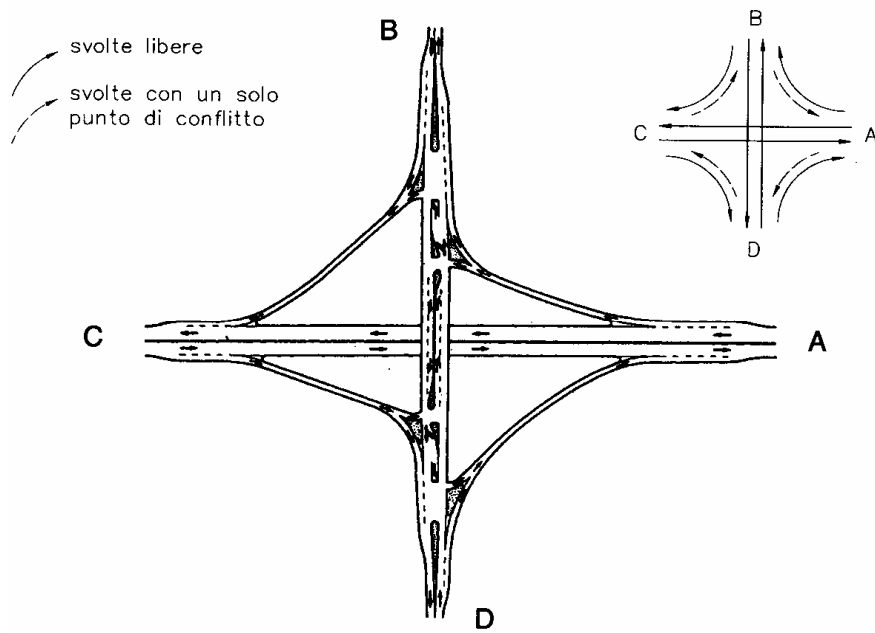


Fig. 47 – Incrocio a rombo con sfalsamento planimetrico delle rampe

9.3.4. Svincoli a T e a Y

Nell'ambito degli incroci a tre rami il più diffuso e noto è lo svincolo a trombetta (Fig. 48) in cui due rampe dirette, una semidiretta ed una a cappio consentono svolte tutte libere. Rappresenta la soluzione classica per la connessione di autostrade a pedaggio con la viabilità ordinaria: infatti le correnti in ingresso ed in uscita transitano tutte attraverso la sezione C-C a valle della quale vengono raggruppati i caselli della stazione di pedaggio.

Va rilevato che le due svolte a sinistra che si avvalgono delle rampe semidiretta e a cappio avvengono a velocità relativamente bassa. Quando si intersecano due strade gerarchicamente pari e non vi sono esigenze di pedaggio, soluzioni alternative che consentono elevate velocità sulle rampe - ma alquanto più costose - sono quelle indicate schematicamente in Fig. 49; in a) si ha un solo manufatto con due livelli sul piano di campagna (in corrispondenza del quale la circolazione si svolge quindi su tre livelli), mentre in b) si hanno tre manufatti. In ambedue i casi, per contenere le pendenze entro limiti accettabili, è necessario "dilatare" l'area dello svincolo; si tratta quindi di soluzioni ottime dal punto di vista della circolazione, ma costose e di impatto visivo notevole nel caso a).

A conclusione della descrizione di incroci a livelli sfalsati fin qui presentati si ritiene opportuno sottolineare che, in base a quanto previsto dalle attuali Norme sulle intersezioni stradali [12] in tema di adottabilità di corsie specializzate (cfr. Tab. 1), le intersezioni di Fig. 44 e Fig. 47 - nel caso in cui gli assi AC siano, ad es., di tipo C - non risultano a norma, giacché sui predetti assi, all'innesto delle rampe sono previste corsie di ingresso.

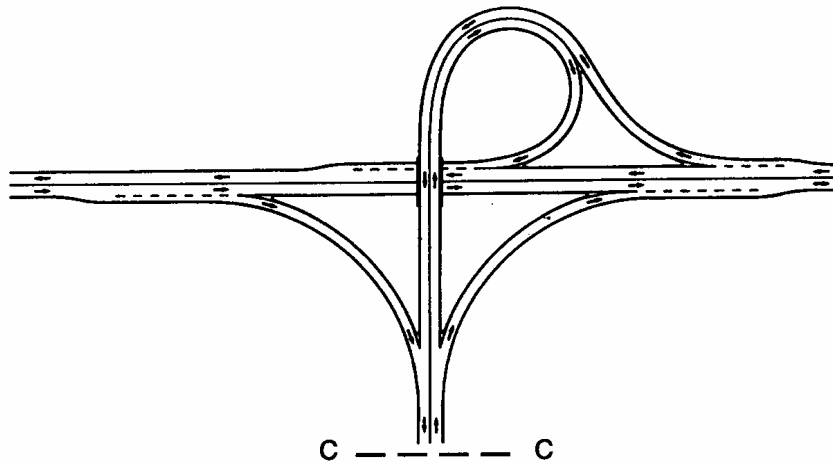


Fig. 48 – Svincolo a trombetta

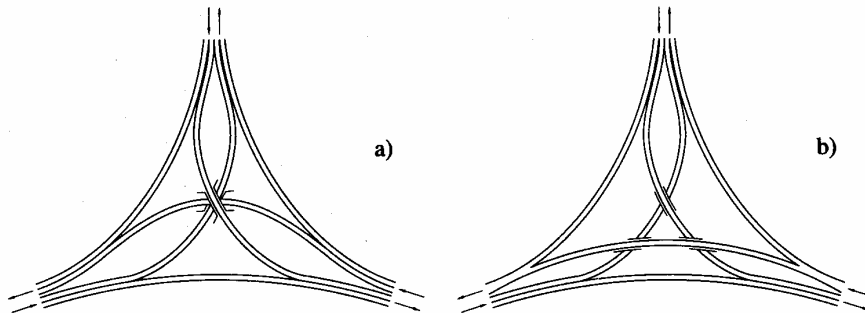


Fig. 49 – Svincoli direzionali a tre rami: a) con un solo manufatto; b) con tre manufatti

9.3.5. Svincoli a quattro rami

Quando si intersecano due strade su cui non sono ammessi punti di conflitto di intersecazione la soluzione più frequentemente adottata è rappresentata dal quadrifoglio completo (Fig. 50): esso è formato da quattro rampe dirette che consentono le svolte a destra, mentre quattro rampe a coppia provvedono alle svolte a sinistra; le immissioni e le uscite avvengono tutte sulla destra. Questo svincolo, che risolve quindi con un unico manufatto il problema dei punti di conflitto, presenta, tuttavia, alcuni inconvenienti: le rampe a coppia comportano riduzioni di velocità ed aumenti di percorso (il fatto che siano poco intuitive è risolto con adeguata segnaletica e comunque gli utenti sono ormai abituati); l'inconveniente maggiore risiede comunque nel fatto che l'immissione sulla strada da una rampa a coppia precede l'uscita dalla stessa strada nel coppia successivo; le corsie di immissione e di uscita spesso si saldano in un'unica corsia addizionale lungo la quale si hanno interferenze tra correnti antagoniste; si ha in effetti una zona di scambio (che interessa di norma anche la prima corsia della strada principale) la quale, per poter funzionare, deve avere lunghezza di alcune centinaia di metri se le portate sono elevate.

Con riferimento alle zone di scambio, le vigenti Norme italiane sulle intersezioni stradali [12] prevedono la configurazione di Fig. 51: in base ad esse, la lunghezza L_{sc} va calcolata con criterio funzionale, ricorrendo quindi, ad es. alla procedura contenuta al Cap.5 di [4]. Con i criteri ivi esposti può conseguirsi anche una valutazione della qualità della circolazione nelle zone di scambio in base ai traffici che le impegnano.

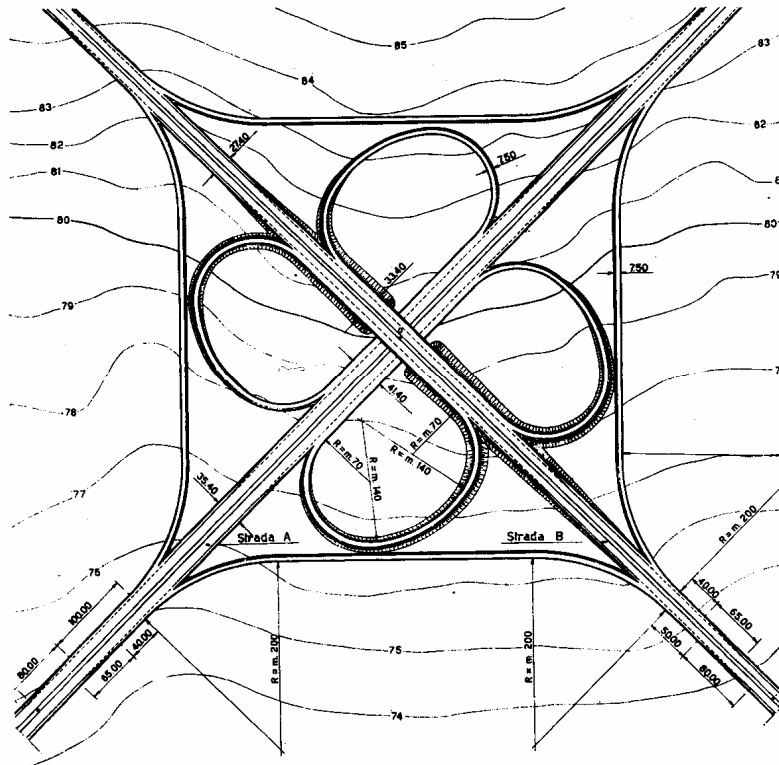


Fig. 50 – Svincolo a quadrifoglio completo

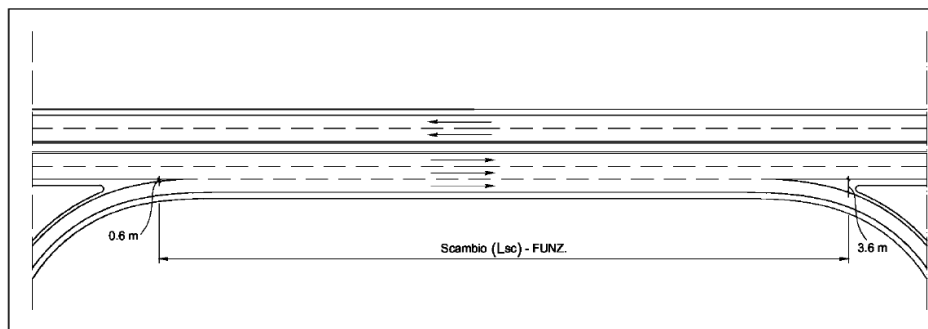


Fig. 51 – Configurazione delle zone di scambio [12]

In alternativa al quadrifoglio sono concepibili numerosi altri schemi più complessi e più costosi ed ai quali si fa ricorso in situazioni o per esigenze particolari, per cui se ne cita solo qualcuno.

In Fig. 52 è riportato lo svincolo detto a rotatoria: le svolte a destra avvengono al solito con rampe dirette, mentre per le svolte a sinistra si impiegano rampe semidirette che nei tratti centrali, a maggior curvatura, si fondono dando luogo ad una rotatoria con quattro zone di scambio; per non ridurre troppo la velocità, per agevolare lo scambio fra correnti e, principalmente, per non penalizzare eccessivamente i profili altimetrici delle rampe, occorre un raggio dell'anello dell'ordine di 130÷150 m; alla notevole area occupata si aggiunge la necessità di ben nove opere di scavalco.

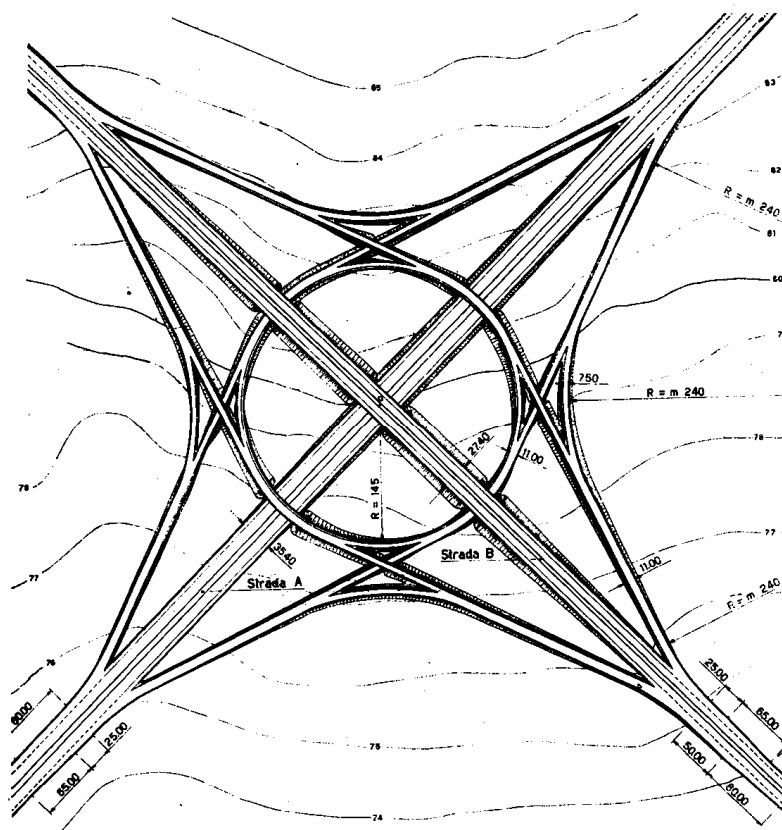


Fig. 52 – Svincolo a rotatoria

Molto compatto planimetricamente ma con elevato sviluppo in altezza è lo svincolo detto Croce di Malta, rappresentato in Fig. 53. Costituisce una eccellente soluzione per quanto riguarda efficienza e sicurezza con uscite ed immissioni sempre in destra e con svolte a sinistra ottenute con rampe

semidirette di sviluppo molto contenuto; con portate elevate (che insieme ad una assoluta carenza di spazio possono giustificare questo tipo di svincolo) i tratti iniziali e terminali, rispettivamente, per le uscite e le immissioni, vanno previsti a due corsie. Come si rileva dalla figura le interferenze vengono eliminate mediante sfalsamento altimetrico e, pertanto, lo svincolo si sviluppa su quattro livelli raggiungendo dislivelli dell'ordine di 20 m tra i piani viabili estremi. Richiede un oculato studio degli andamenti altimetrici e delle opere di scavalco per le quali, oltre agli aspetti puramente strutturali, sarebbe da richiedere una certa valenza architettonica. Il forte impatto visivo ed il costo elevato rappresentano infatti le obiezioni a questo svincolo.

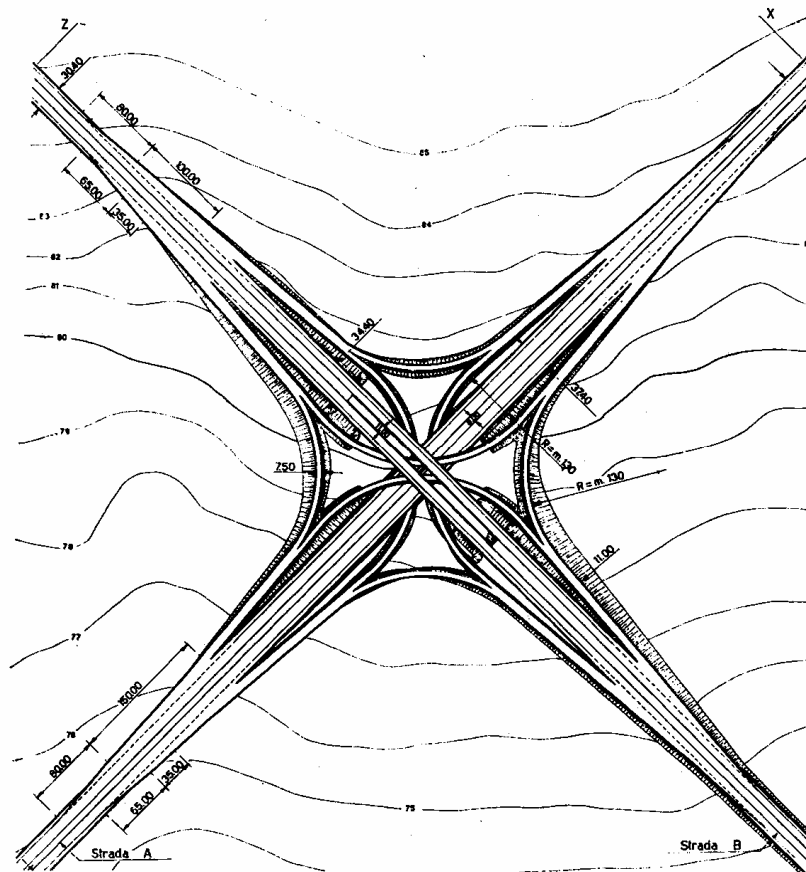


Fig. 53 – Svincolo a quattro livelli (Croce di Malta)

Infine, nella Fig. 54 è rappresentato lo svincolo direzionale completo in cui tutte le svolte sono realizzate mediante rampe dirette e risultano quindi intuitive e di minimo percorso. Vanno tuttavia segnalati alcuni inconvenienti non trascurabili: all'elevato costo derivante sia dalle opere di scavalco (occorrono sedici manufatti di diversa luce e larghezza) si aggiunge la necessità di distanziare le carreggiate per far sì che le rampe di sinistra scavalchino (o sottopassino) la carreggiata di verso opposto. Inoltre le uscite e le immissioni in sinistra, ovvero nella corsia veloce, destano perplessità sulla sicurezza di questo tipo di svincolo.

Situazioni ed esigenze locali possono indurre il progettista a studiare soluzioni non canoniche da esaminare caso per caso.

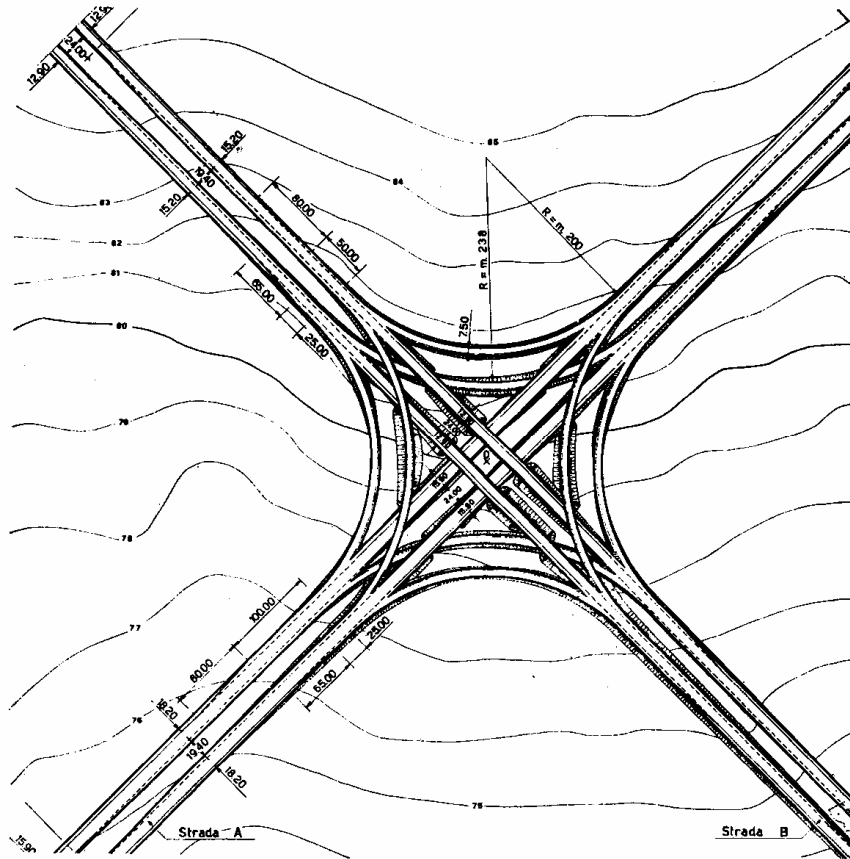


Fig. 54 – Svincolo direzionale completo

Riferimenti bibliografici

- [1] AASHTO, “A Policy on Geometric Design of Highways and Streets”, Washington D.C., 1990
- [2] S. Canale, S. Leopardi, F. Nicosia, “Le intersezioni stradali in ambito extraurbano”, A.I.I.T., Quaderno n°2, Ed. Palombi, 1999,
- [3] S.Canale e al., “Progettare le intersezioni”, Ed.EPC Libri, 2006
- [4] T.Esposito, R.Mauro, “Fondamenti di Infrastrutture Viarie – Vol.2 – La progettazione funzionale delle strade”, Hevelius Edizioni, 2003
- [5] T.Esposito, R.Mauro, “Fondamenti di Infrastrutture Viarie – Vol.1 – La geometria stradale”, Hevelius Edizioni, seconda edizione, 2003
- [6] T. Esposito, R. Mauro, “Le rotatorie”, Seminario di Formazione Tecnica, Urbania, Padova, 1999
- [7] T. Esposito, G. Dell’Acqua, R. Mauro, “Elementi per la scelta ed il progetto delle intersezioni stradali”, Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Trento, 2000
- [8] P. Ferrari, F. Giannini, “Geometria e Progetto di Strade”, ISEDI, 1991
- [9] F. La Camera, “Il calcolo del progetto stradale. La planimetria”, Masson Edit. Sea, 1992
- [10] R. Mauro, “Su alcune recenti acquisizioni in tema di rotatorie - Parte I”, Trasporti e trazione n°2, 1995
- [11] “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, D.M. 05 novembre 2001, G.U. n° 3 del 04/01/2002
- [12] “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni”, D.M. 19 aprile 2006, G.U. n° 170 del 24/07/2006
- [13] M.Servetto, “Strade e Ferrovie”, Il Sole 24 Ore S.p.A., 2006
- [14] SETRA, “Aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales – Carrefours”, 1998
- [15] Transportation Association of Canada (TAC), “Geometric Design Guide for Canadian Roads – Part 2”, Sept. 1999
- [16] Union des professionnels suisses de la route, SNV II Carrefours, Zurigo, 1998