

IL PROGETTO DELLE ROTATORIE NON CONVENZIONALI SECONDO IL D.M. 19/04/2006

Sascia Canale⁽¹⁾, *Natalia Distefano*⁽²⁾, *Salvatore Leonardi*⁽³⁾

⁽¹⁾ Professore ordinario e docente di Teoria delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Catania

⁽²⁾ Dottore di ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Catania

⁽³⁾ Ricercatore Universitario e docente di Infrastrutture Viarie Urbane e Metropolitane - Università degli Studi di Catania

Il D.M. 19/4/2006 recante il titolo “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali” fornisce una classificazione delle rotatorie in base al diametro della corona giratoria. In particolare, vengono introdotte tre classi di rotatorie (mini rotatorie, compatte e convenzionali) che coprono un campo di variabilità del diametro esterno compreso tra 14 m e 50 m.

Lo stesso Decreto afferma poi che “per sistemazioni con *circolazione rotatoria*, che non rientrano nelle tipologie su esposte, il dimensionamento e la composizione geometrica debbono essere definiti con il principio dei tronchi di scambio tra due bracci contigui. In questi casi le immissioni devono essere organizzate con appositi dispositivi”.

Un’interpretazione ragionevole di quest’ultimo passaggio della Norma, porta a ritenere che debbano essere definite “sistemazioni con circolazione rotatoria” tutti quegli schemi di incrocio rientranti nelle due seguenti categorie:

- le **rotatorie circolari di grandi dimensioni**, cioè quelle con diametro maggiore di 50 m;
- tutte quelle configurazioni di incrocio a raso che, pur garantendo una circolazione rotatoria, presentano **forme non circolari** (ellittiche, allungate, a clessidra, ecc.).

Per le suddette categorie di intersezioni, quindi, deve adottarsi un criterio di progettazione basato sulle zone di scambio. Già da subito, appare opportuno manifestare più di una perplessità in merito all'adozione di tale criterio: non appaiono infatti chiare le motivazioni che hanno indotto i redattori della Norma a proporre, per le rotatorie rientranti nelle tre categorie definite inizialmente, il

metodo di progettazione della “rotatoria moderna” o “della precedenza a sinistra”, vale a dire il principio secondo cui i veicoli in immissione devono trovare un varco libero sulla corrente veicolare circolante sull’unica corsia dell’anello giratorio, e ad indicare, per gli altri schemi a circolazione rotatoria, una metodologia progettuale, quella dei tronchi di scambio, concettualmente opposta alla precedente, fondata sull’esecuzione di manovre che richiedono spesso notevoli spazi e che possono comportare la realizzazione di più corsie sulla corona giratoria (soluzione, questa, che amplifica i punti di conflitto all’interno dell’anello, a tutto danno delle prestazioni in termini di sicurezza).

Obiettivo del presente gruppo di ricerca sarà quello di fornire una procedura operativa per dimensionare le intersezioni a circolazione rotatoria secondo il principio dei tronchi di scambio. Al termine dell’esposizione della metodologia di calcolo, si svolgerà un esempio applicativo che ci permetterà di evidenziare ulteriormente i dubbi sull’effettiva validità di un criterio progettuale (quello dei tronchi di scambio) che, per le rotatorie, ormai da qualche decennio, trova pochissimi riscontri nella letteratura tecnica-normativa internazionale.

Metodologia di dimensionamento delle rotatorie basata sul principio dei tronchi di scambio

Riferimenti normativi

Il D.M. 19/4/2006, al paragrafo 5, afferma che “per le manovre di immissione e di scambio, la lunghezza delle corsie specializzate deve essere determinata secondo procedure basate sulla distribuzione probabilistica dei distanziamenti temporali tra i veicoli in marcia, su ciascuna corsia”.

I tronchi di scambio che definiscono la geometria complessiva delle “sistemazioni con circolazione rotatoria”, pertanto, devono avere una lunghezza da determinare tramite l’applicazione di metodologie basate sull’approccio probabilistico ai problemi del deflusso veicolare.

In letteratura esistono diverse metodologie per il dimensionamento delle zone di scambio. Una fra le più autorevoli ed utilizzate è quella proposta dall’Highway Capacity Manual (Ed. 2000), basata sul livello di servizio associato alla densità veicolare della zona di scambio. Si tratta di un criterio

adeguato alla verifica della qualità del funzionamento dei tronchi di scambio, ma fondato su teorie che esulano dall'approccio probabilistico suggerito dalla Normativa italiana per la progettazione delle sistemazioni a circolazione rotatoria. Da qui, l'esigenza di elaborare una metodologia "ad hoc" che verrà illustrata nel seguito del presente contributo.

Funzionamento dello scambio

Le **zone di scambio**, per funzionare correttamente, devono garantire a due correnti veicolari che marciano nella stessa direzione di incrociarsi reciprocamente nello spazio della carreggiata. Dall'analisi dello schema classico di zona di scambio a 3 corsie, riportato nel D.M. 19/4/2006 (Fig. 1), si evincono i quattro flussi di traffico entranti in gioco: due che non scambiano e che proseguono senza cambiare corsia (Q_{ns1} , Q_{ns2}), e due che sono costretti a deviare dalla propria corrente di origine e ad attraversarsi reciprocamente per inserirsi nel flusso di traffico parallelo (Q_{s1} , Q_{s2}) (Fig. 1).



Figura 1. Schema di zona di scambio e portate veicolari di riferimento.

Si noti che, nello schema precedente, il flusso Q_{ns2} pur non scambiando è comunque condizionato dal complesso delle manovre di scambio interessanti il tronco; ciò si ripeterebbe identicamente anche per il flusso Q_{ns1} , qualora la zona di scambio fosse costituita da due sole corsie.

Le correnti veicolari che scambiano, pertanto, devono attendere che si presenti loro un intervallo temporale adeguato tra i veicoli della corrente di traffico entro cui devono inserirsi. Questa "attesa" si può ipotizzare che avvenga a velocità di marcia pressoché costante.

L'approccio teorico che si intende adottare per la determinazione della lunghezza L_s del tronco di scambio, è quindi analogo a quello che in genere si impiega per lo studio delle corsie di entrata a partire dalle rampe (caso delle

intersezioni a livelli sfalsati) e delle corsie di immissione susseguenti alle curve di ciglio (caso delle intersezioni a raso lineari). In ambedue i casi, le corsie di entrata vengono propriamente definite “corsie di attesa” (cfr. Progettare le intersezioni. EPC Libri – Ottobre 2006).

Concetto di intervallo critico

In base all'approccio appena descritto, affinché il veicolo della corrente che non scambia non sia costretto a rallentare o a cambiare corsia (nel caso di zone di scambio a più corsie) dal veicolo che intende completare la manovra di scambio, è necessario che quest'ultimo esegua l'inserimento garantendo una distanza almeno pari a quella di sicurezza tra sé ed il veicolo della corrente veicolare non scambiante che lo precede, e tra sé ed il veicolo che segue.

Il tipo di immissione che si è appena descritto si definisce “immissione ideale”, mentre viene denominato “intervallo critico” (T) il più piccolo intervallo temporale fra due veicoli della corrente veicolare non interessata dallo scambio che consente un'immissione ideale.

L'espressione analitica che permette di quantificare l'intervallo critico è la seguente:

$$T = \frac{V_{mns} - V_{ms}}{3,6 \cdot 2 \cdot a} + 2 \cdot \delta \quad [1]$$

Dove:

- V_{mns} = velocità media del flusso veicolare che non scambia (km/h);
- V_{ms} = velocità media del flusso veicolare che scambia (km/h);
- δ = intervallo temporale di sicurezza tra due veicoli consecutivi (si pone generalmente pari ad 1 secondo);
- a = accelerazione longitudinale (posta pari a $1,2 \text{ m/s}^2$).

È ragionevole, in fase di progetto, ammettere l'uguaglianza delle velocità di entrambi i flussi (quello che scambia e quello che non scambia). In tal modo si ottimizza il funzionamento dello scambio, evitando che la corrente veicolare che scambia, qualora fosse più lenta di quella che non scambia, risulti penalizzata dalla ricerca di intervalli critici troppo elevati e quindi caratterizzati da ridotte probabilità di accadimento.

In virtù di tale ipotesi ($V_{mns}=V_{ms}$) l'intervallo critico si riduce al secondo dei due addendi riportati nella formula precedente:

$$T = 2 \cdot \delta$$

In definitiva, si adotterà un intervallo critico pari a 2 secondi; ciò vuol dire che un veicolo in procinto di eseguire la manovra di scambio, deciderà di inserirsi nella corrente veicolare parallela, quando, all'interno della corrente medesima, avrà a disposizione un varco temporale pari ad almeno 2 secondi.

Portata veicolare virtuale

Un concetto basilare che si è reso necessario introdurre al fine di una adeguata caratterizzazione numerica della lunghezza della zona di scambio è quello della **portata veicolare virtuale (Q_v)**. Con riferimento al tronco di scambio a due corsie rappresentato nella figura 2, si deve notare che ciascuno dei flussi scambianti (Q_{s1} e Q_{s2}), nella ricerca dell'intervallo critico all'interno della rispettiva corrente parallela (Q_{ns2} e Q_{ns1}) potrebbe subire i condizionamenti dei veicoli che, dualmente, intendono eseguire la manovra di scambio (ad es. il flusso Q_{s1} per potersi inserire nella corrente Q_{ns2} , potrebbe venire disturbato dal flusso Q_{s2} che si accinge, in maniera analoga, ad effettuare lo scambio); ciò accadrebbe, nell'evenienza in cui si verificasse la presenza simultanea di due veicoli, appartenenti alle due correnti di scambio opposte, in posizione pressoché parallela. Al fine di tener conto di tali condizionamenti, si è pensato di introdurre una *portata veicolare virtuale, costituita dal flusso che non scambia più una quota parte del flusso che, muovendosi nella stessa direzione del flusso che non scambia, intende eseguire la manovra di scambio.*



Figura 2. Zona di scambio a due corsie e portate veicolari di riferimento.

Si possono così definire le due seguenti portate virtuali (Q_{v1} , Q_{v2}):

$$Q_{v1} = Q_{ns1} + K \cdot Q_{s1} \quad [2]$$

$$Q_{v2} = Q_{ns2} + K \cdot Q_{s2} \quad [3]$$

Si propone che il fattore K, riportato nelle due espressioni precedenti, assuma il valore di 0,5. Si osservi infatti che il flusso in immissione sulla corrente veicolare non scambiante avrà la massima probabilità di vedersi impedito l'accesso all'interno di tale corrente di traffico nella prima parte della zona di scambio, mentre la minima probabilità che tale impedimento si verifichi si manifesterà nell'ultima parte del tronco di scambio (quando, cioè, è presumibile che gran parte del flusso di scambio in opposizione abbia già completato la manovra). Si ritiene ragionevole, dunque, quantificare l'influenza reciproca dei flussi che scambiano come la metà del valore numerico della portata veicolare.

Probabilità di progetto

Proseguendo nella caratterizzazione probabilistica della lunghezza di scambio, bisogna ora considerare che il presentarsi dell'intervallo critico (T) è, in ogni caso, un evento aleatorio. Si può ipotizzare, pertanto, che gli intervalli temporali (τ) con cui i veicoli della corrente virtuale si succedono dinanzi a quello che vuole immettersi siano distribuiti con la legge di distribuzione della probabilità di Poisson, così espressa:

$$f(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \tau} \quad [4]$$

dove λ è il valore medio degli arrivi nell'unità di tempo, valutabile con la seguente relazione:

$$\lambda = \frac{Q_{vi}}{3600} \quad [5]$$

con:

Q_{vi} = portata veicolare virtuale espressa in veicoli orari ($i = 1$ o 2).

La probabilità che il generico intervallo di tempo τ sia maggiore dell'intervallo critico T è dunque:

$$\Pr(\tau \geq T) = e^{-\lambda \cdot T} \quad [6]$$

Tramite la [6], si calcola il valore di probabilità associato al verificarsi di un intervallo di tempo pari a quello critico durante il primo evento possibile (ovvero dopo aver atteso il passaggio del primo veicolo).

Lo spazio impegnato dai veicoli in attesa di poter scambiare (L_{s0}), in tal caso, è quello minimo indispensabile, cioè:

$$L_{s0} = V_{ms} \cdot T \quad [7]$$

È chiaro che, in fase di progetto, non si può ritenere sempre accettabile il valore di probabilità associato al primo evento.

Occorre, pertanto, fissare una *probabilità di progetto* e calcolare conseguentemente il numero di eventi (passaggi di veicoli consecutivi sulla corsia di marcia principale) in grado di garantire il manifestarsi della probabilità medesima.

La probabilità che, dopo il secondo evento, si abbia $\tau \geq T$ è la seguente:

$$\Pr(\tau \geq T) = (1 - e^{-\lambda \cdot T}) \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad [9]$$

Se risultasse necessario aspettare anche il terzo evento per ottenere la probabilità richiesta, occorrerebbe procedere con il calcolo di seguito riportato:

$$\Pr(\tau \geq T) = [1 - e^{-\lambda \cdot T} - (1 - e^{-\lambda \cdot T}) \cdot e^{-\lambda \cdot T}] \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad [10]$$

Al termine di questo processo a cascata, si perverrà all'individuazione dell'evento k-esimo al quale è associata la probabilità di progetto. In tal caso, la lunghezza del tronco di scambio sarà data dalla seguente espressione:

$$L_S = (k - 1) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot V_{ms} \quad [11]$$

dove:

- k = numero di eventi (passaggi della corrente veicolare virtuale) corrispondente al valore della probabilità di progetto;
- $1/\lambda$ = durata temporale del singolo evento (s);
- V_{ms} = velocità media di scambio (m/s).

Riguardo al valore numerico da attribuire alla velocità media di scambio, si è elaborato un criterio di scelta basato sul "livello di qualità" che si intende garantire sul tronco di scambio. Tale livello di qualità, connesso alla fluidità

delle manovre di scambio, è stato conseguentemente associato ai possibili valori assunti dalla velocità media di scambio. In particolare, sono stati definiti i quattro seguenti livelli di qualità:

- **livello di qualità scadente** dello scambio, associato a $V_{ms} = 20$ km/h;
- **livello di qualità sufficiente** dello scambio, associato a $V_{ms} = 30$ km/h;
- **livello di qualità buono** dello scambio, associato a $V_{ms} = 40$ km/h;
- **livello di qualità ottimo** dello scambio, associato a $V_{ms} = 50$ km/h.

Dalla relazione [11], risulta evidente che l'estensione della zona di scambio varierà in funzione del livello di qualità dello scambio prescelto dal progettista.

Un'altra scelta che spetta al progettista è, come già detto, quella del percentile del tempo di attesa in funzione del quale si perviene alla valutazione numerica della lunghezza del tronco di scambio. È consigliabile l'adozione di un percentile abbastanza elevato del tempo di attesa, in genere il novantesimo. Non bisogna però escludere la possibilità, in presenza di situazioni specifiche (essenzialmente dettate da vincoli spaziali), di adottare dimensioni della lunghezza di scambio associate a percentili del tempo di attesa più bassi. Si consiglia, in ogni caso, di non scendere mai al disotto del 70% come valore di soglia della probabilità che si verifichi un varco temporale maggiore o uguale all'intervallo critico.

Abachi per il calcolo della lunghezza di scambio

Con l'applicazione della metodologia proposta, si perviene alla determinazione di due valori della lunghezza di scambio: uno (L_{s1}) associato al flusso di scambio Q_{s1} ed alla portata virtuale Q_{v2} , e uno (L_{s2}) relativo al flusso di scambio Q_{s2} ed alla portata virtuale Q_{v1} ; la scelta finale dovrà ricadere sulla maggiore delle lunghezze di scambio.

La lunghezza della zona di scambio ($L_{scambio}$), dunque, sarà fornita dalla relazione seguente:

$$L_{scambio} = \max(L_{s1}, L_{s2}) \quad [12]$$

A seguito dell'applicazione dell'iter procedurale descritto fino a questo punto sono stati elaborati gli abachi riportati nelle figure 2, 3, 4 e 5. Ognuno degli abachi è relativo ad uno dei livelli di qualità dello scambio che possono essere

adottati e le tre curve riportate in ciascuno di essi sono associate ai possibili valori delle probabilità di progetto.

In definitiva, per la determinazione della lunghezza delle zone di scambio presenti in una intersezione a circolazione rotatoria, occorre riferirsi alla procedura sintetizzata tramite i 4 step di seguito riportati:

- 1) individuazione dei tronchi di scambio presenti nella rotatoria e valutazione, per ciascuno di essi, delle portate di scambio e di non scambio, nonché delle portate virtuali;
- 2) scelta del livello di qualità da attribuire allo scambio (scadente, sufficiente, buono, ottimo) e della probabilità di progetto (90%, 80%, 70%);
- 3) determinazione, per ognuna delle zone di scambio, delle lunghezze di scambio (L_{s1} , L_{s2}) tramite gli abachi rappresentati nelle figure 3, 4, 5 e 6;
- 4) valutazione della lunghezza di scambio $L_{scambio}$, per ognuno dei tronchi di scambio della rotatoria.

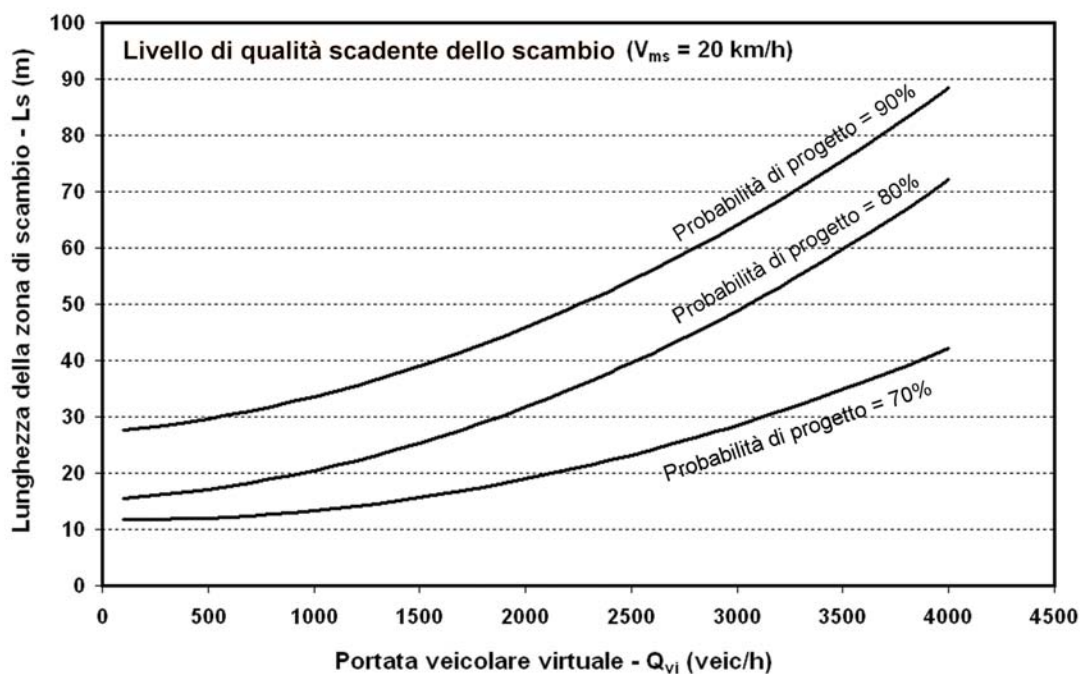


Figura 3. Abaco per il calcolo della lunghezza di scambio (Livello di qualità scadente).

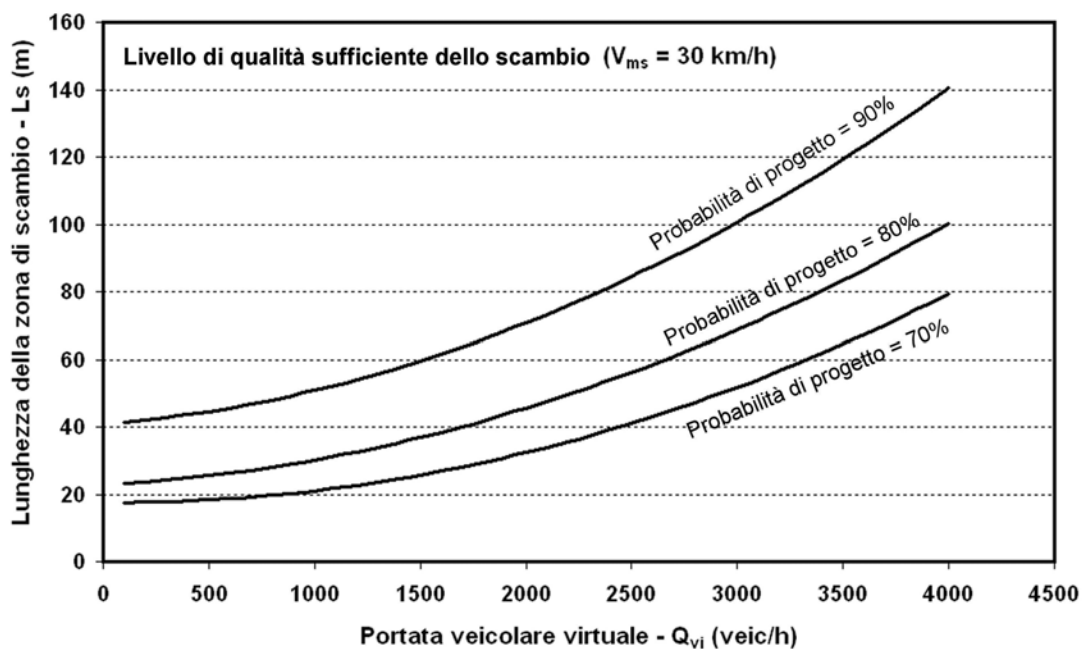


Figura 4. Abaco per il calcolo della lunghezza di scambio (Livello di qualità sufficiente).

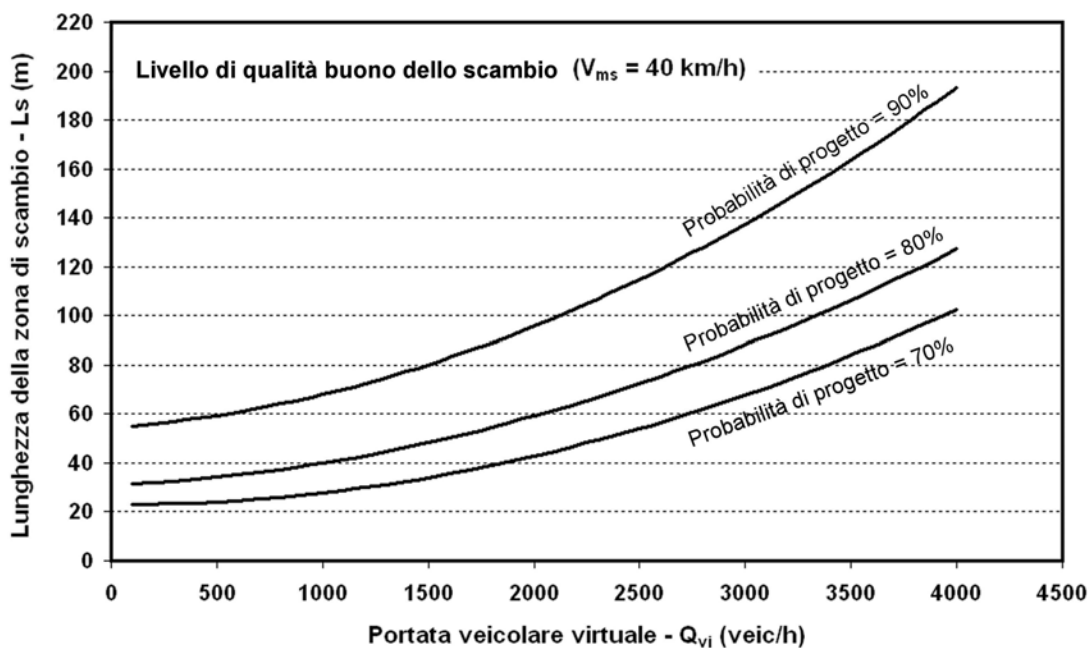


Figura 5. Abaco per il calcolo della lunghezza di scambio (Livello di qualità buono).

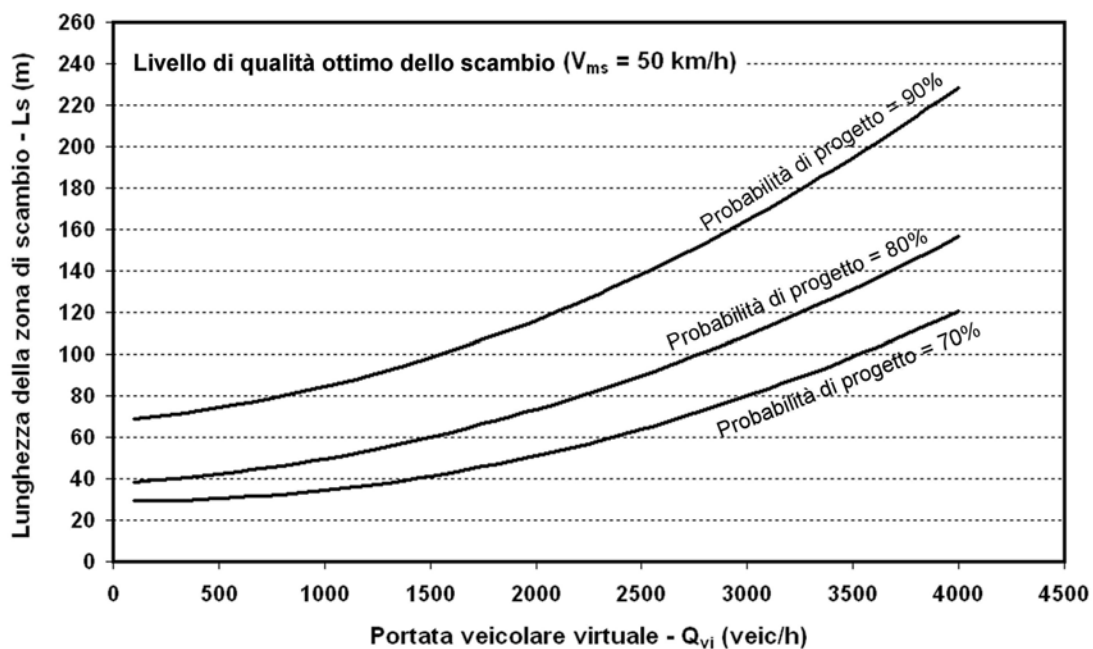


Figura 6. Abaco per il calcolo della lunghezza di scambio (Livello di qualità ottimo).

Si noti infine che la metodologia esposta ha preso in considerazione il caso di zone di scambio formate da due sole corsie, delle quali una è rappresentata dalla corona giratoria e l'altra è costituita dalla corsia parallela all'anello.

Il caso di tronchi di scambio con un numero di corsie maggiore di due può essere contemplato considerando una o più corsie aggiuntive disposte sulla corona giratoria; in tale situazione il flusso di non scambio Q_{ns1} viaggerà sulla/e corsia/e interna/e della corona giratoria ed il suo valore non dovrà essere computato nella valutazione della portata virtuale Q_{v1} .

Ulteriori criteri progettuali

Al fine di ottimizzare geometricamente le intersezioni a circolazione rotatoria, occorre prendere in considerazione i seguenti criteri progettuali:

- il diametro della rotatoria (riferito alla corona giratoria) dipenderà dalla composizione dei tronchi di scambio e delle larghezze delle isole divisionali. Occorre poi mettere in conto gli angoli al centro che definiscono la posizione reciproca dei rami confluenti all'incrocio. Con riferimento alla figura 7, si ha:

$$D = f(n, L_{sj}, L_{ij}, \alpha_j) \text{ per } j=1, 2, \dots, n$$

dove:

- D = diametro della corona giratoria (m);
 - n = numero delle zone di scambio nella rotatoria;
 - L_{sj} = lunghezza della j -esima zona di scambio (m);
 - L_{ij} = larghezza della j -esima isola divisionale computata in corrispondenza dell'estremità superiore del ramo (m);
 - α_j = angolo al centro individuato dagli assi dei rami delimitanti la j -esima zona di scambio;
- le isole divisionali devono essere progettate in modo da svolgere un ulteriore compito, cioè quello di garantire un'immissione protetta ai veicoli provenienti dai rami di entrata e che si immettono sulla corsia esterna dei tronchi di scambio;
- la larghezza delle corsie costituenti la zona di scambio deve essere scelta in funzione dei seguenti criteri: la corsia interna, coincidente con l'anello circolatorio, deve avere un'ampiezza tale da permettere la rotazione di tutte le categorie di veicoli ammesse sulla rotatoria (tale larghezza deve essere determinata, quindi, in funzione del raggio dell'isola centrale e delle tipologie di veicoli transitanti; si vedano, in proposito, le indicazioni fornite nella tabella 1, tratta dal testo "Progettare le rotatorie". EPC Libri – Settembre 2005); la corsia esterna dovrebbe avere una larghezza pari a quella dell'ingresso;
- se indichiamo con R_s il raggio dell'isola centrale addizionato della larghezza complessiva della zona di scambio (Fig. 7), si dovrebbe sempre garantire la seguente condizione geometrica: $R_e \leq R_s \leq R_u$ (dove R_e ed R_u sono, rispettivamente, il raggio di curvatura in ingresso e quello in uscita); ciò al fine di consentire ai veicoli in ingresso velocità compatibili con quelle di scambio e a quelli in uscita la possibilità di un rapido deflusso.

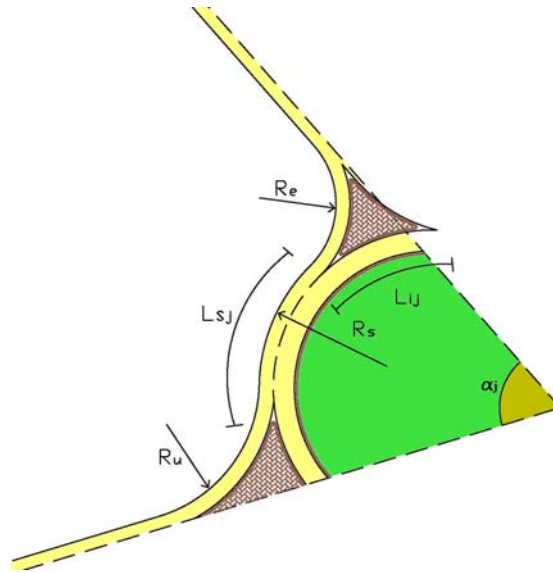


Figura 7. Elementi progettuali di una rotatoria dimensionata col criterio dei tronchi di scambio.

Raggio dell'isola centrale (m)	Tipologia di veicolo		
	Autovettura	Autocarro Autobus	Autoarticolato
	LARGHEZZA DELLA CORONA GIRATORIA (m)		
15	3,50	6,00	7,15
16	3,50	5,95	6,95
17	3,25	5,80	6,75
18	3,20	5,70	6,55
19	3,20	5,60	6,40
20	3,15	5,55	6,25
21	3,10	5,50	6,10
22	3,00	5,50	5,95
23	3,00	5,45	5,95
24	3,00	5,45	5,90
25	3,00	5,40	5,90
26	3,00	5,35	5,85
27	3,00	5,30	5,80
28	3,00	5,30	5,75
29	3,00	5,25	5,65
30	3,00	5,25	5,60
35	3,00	5,20	5,55
40	3,00	5,15	5,50

Tabella 1. Larghezze della corona giratoria (rotatoria a singola corsia).

Applicazione della metodologia proposta e confronto con il criterio delle rotatorie moderne

Si procederà adesso con l'illustrazione di una analisi comparativa tra due schemi di rotatoria con ampio diametro (oltre i 50 m) progettati, rispettivamente, con il criterio dei tronchi di scambio (così come prescritto dal

D.M. 19/4/2006) e con il criterio della precedenza ai veicoli in circolo sull'anello (validi, secondo il D.M. 19/4/2006, per rotatorie con diametri fino a 50 metri).

L'obiettivo di tale confronto è essenzialmente quello di pervenire ad una migliore comprensione non solo delle diverse peculiarità dei due criteri progettuali ma anche dei differenti requisiti funzionali (prestazioni operative, sicurezza, costi) offerti dalle due tipologie di rotatorie.

Parametri di progetto

Si riportano di seguito le matrici Origine/Destinazione relative alle 3 direttrici confluenti all'incrocio. Si sono scelte 2 diverse ore di punta, in quanto descrittive delle massime condizioni di carico per tutti i rami della rotatoria (Tab. 2 e Tab. 3).

O \ D	A	B	C
A	-	280 veic/h	750 veic/h
B	190 veic/h	-	350 veic/h
C	120 veic/h	170 veic/h	-

Tabella 2. Matrice origine/destinazione relativa all'ora di punta mattutina (ore 8:00-9:00)

O \ D	A	B	C
A	-	130 veic/h	180 veic/h
B	190 veic/h	-	150 veic/h
C	680 veic/h	240 veic/h	-

Tabella 3. Matrice origine/destinazione relativa all'ora di punta serale (ore 18:00-19:00)

Riguardo alla rotatoria progettata con il criterio delle zone di scambio, si sono ottenuti i parametri progettuali indicati nella tabella 4, dedotti sulla base degli step caratterizzanti la procedura proposta:

- valutazione, per i tre tronchi di scambio, delle portate di scambio, di non scambio, e delle portate virtuali (Tab. 5);
- scelta del livello di qualità ottimo dello scambio e della probabilità di progetto pari all'80%;
- determinazione, per ognuna delle zone di scambio, delle lunghezze di scambio (L_{s1} , L_{s2}) tramite l'abaco di figura 6;
- valutazione della lunghezza di scambio $L_{scambio}$, per ognuno dei tronchi di scambio della rotatoria.

Diametro esterno (D) = 64 m R _s = 32+4 = 36 m				
Zona di scambio	L _{scambio} (m)	LdS	R _e (m)	R _u (m)
A-B	44	D	20	35
B-C	42	D	20	35
C-A	46	C	20	35

Tabella 4. Parametri geometrico-funzionali della rotatoria progettata con i tronchi di scambio.

Zona di scambio	Q _{ns}	Q _{sc1}	Q _{sc2}	Q _{v1}	Q _{v2}
A-B	280 veic/h	750 veic/h	170 veic/h	655 veic/h	85 veic/h
B-C	350 veic/h	190 veic/h	750 veic/h	445 veic/h	375 veic/h
C-A	680 veic/h	240 veic/h	190 veic/h	800 veic/h	65 veic/h

Tabella 5. Portate veicolari necessarie per la valutazione delle lunghezze di scambio.

I dati di progetto della soluzione basata sul criterio della precedenza a sinistra sono riportati nella tabella 6.

Diametro esterno (D) = 60 m			
Ramo	LdS	R _e (m)	R _u (m)
A	D	20	30
B	C	20	30
C	B	20	30

Tabella 6. Parametri geometrico-funzionali della rotatoria con precedenza sull'anello.

Le configurazioni finali delle due rotatorie sono riportate nelle figure 8 e 9.

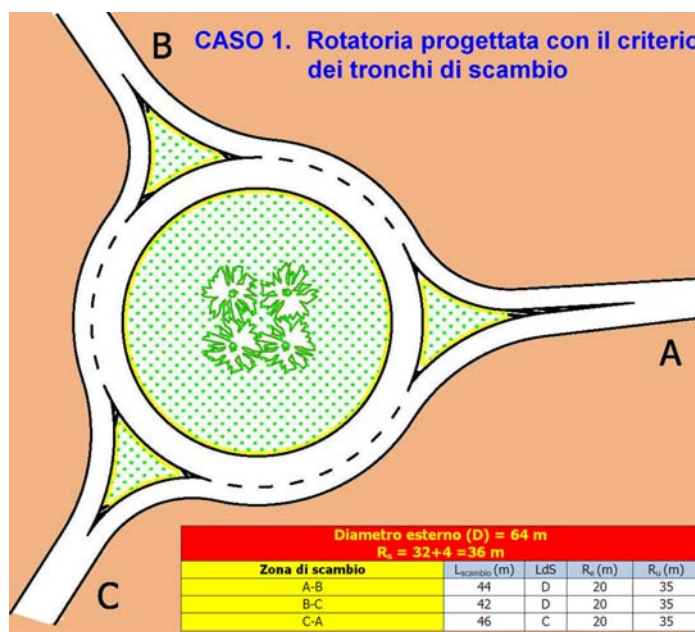


Figura 8. Soluzione progettuale ottenuta col criterio dei tronchi di scambio.

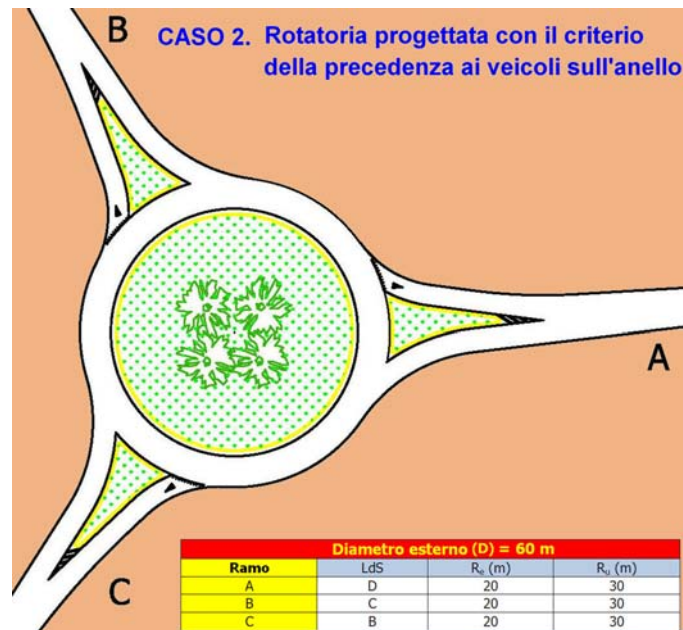


Figura 9. Soluzione progettuale eseguita col criterio della precedenza a sinistra.

Prestazioni operative

Nelle tabelle precedenti sono state riportate le indicazioni in merito alle prestazioni operative dei due schemi di rotatoria.

In particolar modo, sono stati valutati i livelli di servizio (LdS) delle zone di scambio componenti la prima rotatoria, ed i livelli di servizio (LdS) dei rami confluenti nel secondo schema d'incrocio.

Entrambe le procedure applicate sono state dedotte dall'Highway Capacity Manual (2000).

È da notare che il significato del concetto di livello di servizio è radicalmente differente per i due schemi di progetto, proprio perché è fondamentale diverso l'approccio progettuale nei due casi. Nel caso della rotatoria progettata col criterio dei tronchi di scambio, il livello di servizio è associato alla densità veicolare nella zona di scambio la quale, a sua volta, è influenzata dalla velocità media veicolare. Per la rotatoria progettata col criterio della precedenza ai veicoli in circolo, invece, il livello di servizio corrisponde al ritardo medio di fermata accumulato da un utente in coda sul ramo di ingresso, in attesa di un intervallo accettabile per potersi immettere nel flusso circolante sull'anello.

Nonostante non si possa svolgere un paragone puntuale tra i livelli di servizio delle due soluzioni progettuali, si può però affermare che le prestazioni operative del secondo schema sono globalmente migliori di quelle offerte dalla rotatoria progettata con i tronchi di scambio; infatti mentre nel primo schema ci sono ben due zone di scambio al livello di servizio D (e, comunque, non si scende al di sotto del livello di servizio C), nella seconda soluzione c'è un solo ramo al livello di servizio D e, per un altro braccio, si manifesta perfino il livello di servizio B.

Costi di realizzazione

La realizzazione del primo schema di rotatoria comporta un impegno di superficie pari a circa 4070 m², mentre la seconda rotatoria richiede l'occupazione di un'area di circa 2830 m² (il rapporto tra le superfici impegnate nel primo e nel secondo caso è, quindi, all'incirca pari a 1,5).

Pur non quantificando i costi associati all'una e all'altra soluzione, si può affermare che le spese relative alla costruzione della prima rotatoria sono valutabili, in prima battuta, in almeno una volta e mezza quelle della seconda rotatoria.

Livello di sicurezza

Le considerazioni in merito alle differenti prestazioni di sicurezza offerta dai due schemi di rotatoria sono indipendenti dall'esempio specificatamente svolto e sono, quindi, generalizzabili.

Notoriamente, in una "rotatoria moderna" con un'unica corsia sull'anello e con ingressi ad una sola corsia, si hanno 6 punti di conflitto (rotatoria a 3 rami) o 8 punti di conflitto (rotatoria a 4 rami); si tratta di punti di conflitto che per metà sono di diversione e per metà di confluenza.

Se si fa riferimento, invece, ad una rotatoria progettata con il criterio dei tronchi di scambio, si deve considerare che ad ogni zona di scambio (costituita da due corsie) competono 4 punti di conflitto (2 di diversione e due di immissione); ciò vuol dire che in una rotatoria a 3 rami ci saranno 12 punti di conflitto e, in uno schema a 4 bracci, si avranno 16 punti di conflitto.

In generale, dunque, i punti di conflitto caratteristici di una rotatoria costituita dall'assemblaggio di più zone di scambio sono in numero doppio rispetto alla corrispondente rotatoria con precedenza a sinistra; ne consegue l'ovvia preferenza per quest'ultima soluzione, qualora fosse ammessa dalle Norme, nel caso in cui si considerino discriminanti le prestazioni in termini di sicurezza.

Un altro aspetto che evidenzia il maggior grado di sicurezza dello schema con precedenza ai veicoli in circolo è quello relativo alla semplicità e alla intuitività del comportamento da parte dei veicoli in immissione, in circolo e in uscita. Nel caso della soluzione progettuale con i tronchi di scambio, invece, gli utenti che, dopo l'immissione, volessero uscire in un ramo diverso da quello immediatamente successivo, non sono adeguatamente guidati verso il corretto comportamento (spostamento a sinistra per l'esecuzione dello scambio); ciò a causa dell'inesistenza di una segnaletica preposta a fornire le indicazioni su come affrontare in maniera appropriata le zone di scambio. Le conseguenze possono tradursi sia in uno scadimento del livello di servizio del tronco di scambio, sia in comportamenti impropri degli utenti che possono originare pericolose manovre azzardate (ad es., bruschi rientri all'interno della corona giratoria con conseguente rischio di urti con i veicoli in circolo).

Conclusioni

Con il presente contributo gli autori hanno inteso fornire una metodologia operativa per la progettazione delle "sistemazioni con circolazione rotatoria" così come definite nel D.M. 19/4/2006.

La procedura, basata su un approccio di tipo probabilistico, è supportata da una serie di abachi di calcolo che permettono ai progettisti di giungere alla caratterizzazione geometrica di una rotatoria in maniera pressoché immediata, una volta noti i flussi veicolari in gioco e dopo aver scelto il livello di qualità dello scambio e la probabilità di progetto.

In parallelo, si è proceduto con una revisione critica della Normativa italiana in merito alla progettazione delle intersezioni a circolazione rotatoria con il metodo dei tronchi di scambio e, a tal fine, si è svolta una "valutazione

comparativa” tra due esempi di “grandi rotatorie”, una progettata col criterio delle zone di scambio e l’altra con il principio del diritto di precedenza ai veicoli in circolo sulla corona.

L’esito di questo confronto comparativo, pur globalmente non generalizzabile, ha comunque evidenziato come non ci sia una reale convenienza nell’adozione di schemi a circolazione rotatoria costituiti dall’assemblaggio di una serie di tronchi di scambio. Le prestazioni operative, in termini di livelli di servizio, nonché i costi di realizzazione non sembrano giocare a favore della soluzione progettuale provvista delle zone di scambio. Le prestazioni in termini di sicurezza, poi, sono certamente migliori nel caso di rotatorie con precedenza sull’anello.

Il presente gruppo di ricerca, in definitiva, auspica che in una futura revisione della Norma sulle intersezioni stradali si valuti l’opportunità di estendere il campo di applicazione delle “rotatorie moderne” anche a tutti i possibili schemi non convenzionali.