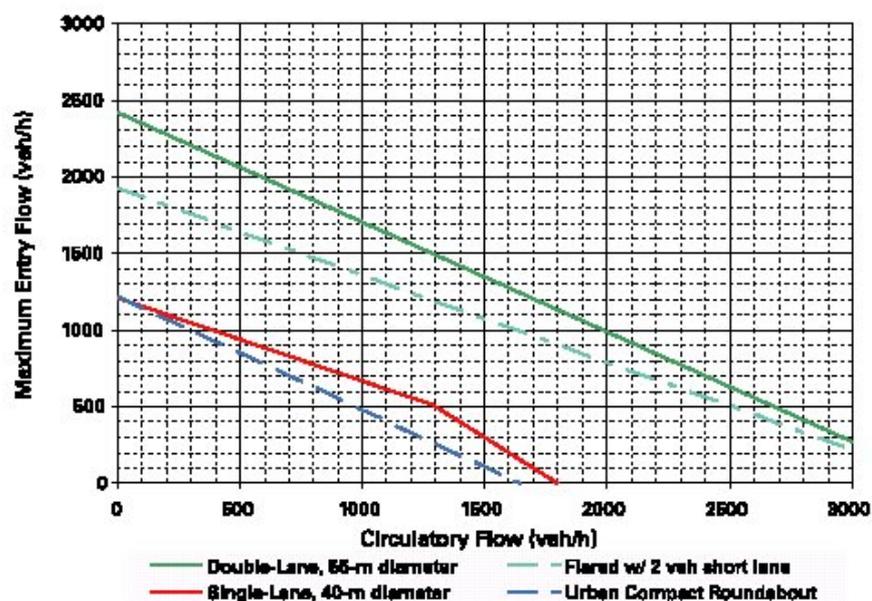


Il calcolo della capacità delle rotatorie

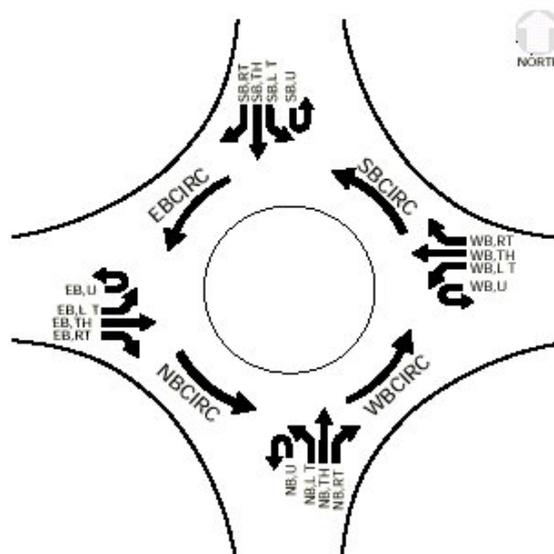
- il limite operativo delle circolazioni rotatorie consiste nel blocco totale veicolare quando si raggiunge il livello di saturazione (3000-4000 veic/h in entrata nelle ore di punta);
- bisogno di dimensionare la rotatoria secondo un percorso analitico, che tenga conto della capacità di progetto che si vuole assegnare:
 - la capacità semplice è il primo valore di capacità che può ottenersi ad un ingresso per l'aumento dei flussi;
 - la capacità complessiva è invece la sommatoria di tutte le capacità di ingresso alla rotatoria quando le stesse si considerano simultaneamente;
- la capacità dell'intera rotatoria dipende da molti termini, essa non è molto studiata;
- si studia invece la capacità di ogni singolo braccio (*il più piccolo valore del flusso orario sul braccio, che determina la presenza permanente di veicoli in attesa*);
- si assume un rapporto flussi di traffico su un approccio / capacità su ogni braccio non superiore a 0.85 perché oltre le condizioni di esercizio della rotatoria peggiorano rapidamente (code e rallentamenti superiori ai loro valori medi e che crescono esponenzialmente) [riferimento usato in Australia, Germania, Regno Unito e Stati Uniti]

Fattori condizionanti:

- gli elementi geometrici influenzano la capacità (due corsie di entrata quasi raddoppiano il flusso di entrata di una corsia, imponendo anelli più larghi; anelli più larghi permettono ai veicoli di viaggiare fianco a fianco fra di loro o l'uno di seguito all'altro in gruppi più stretti, con varchi più larghi tra gruppi di veicoli);
- il flusso di entrata è semplicemente la somma dei flussi che compiono le manovre di attraversamento, svolta a sinistra e destra su un approccio.



- al crescere del flusso sull'anello diminuisce la capacità (si hanno minori varchi accettati), quindi occorre fissare la matrice origine-destinazione M il cui generico elemento (i,j) rappresenta il flusso in ingresso dal braccio i che esce al braccio j , dalla quale si ricava la matrice di distribuzione N , il cui generico elemento (i,j) fornisce la frazione del flusso entrante da i e che esce in j ;
- il flusso che circola è la somma dei veicoli provenienti da diverse direzioni e che passano di fronte all'isola di separazione adiacente:



$$\begin{aligned}
 V_{EB,circ} &= V_{WB,LT} + V_{SB,LT} + V_{SB,TH} + V_{NB,U} + V_{WB,U} + V_{SB,U} \\
 V_{WB,circ} &= V_{EB,LT} + V_{NB,LT} + V_{NB,TH} + V_{SB,U} + V_{EB,U} + V_{NB,U} \\
 V_{NB,circ} &= V_{EB,LT} + V_{EB,TH} + V_{SB,LT} + V_{WB,U} + V_{SB,U} + V_{EB,U} \\
 V_{SB,circ} &= V_{WB,LT} + V_{WB,TH} + V_{NB,LT} + V_{EB,U} + V_{NB,U} + V_{WB,U}
 \end{aligned}$$

- la capacità delle rotatorie è più grande alle basse velocità sull'anello perché si riduce il varco cercato dai veicoli entranti, con minori tempi di attesa.

I metodi di calcolo:

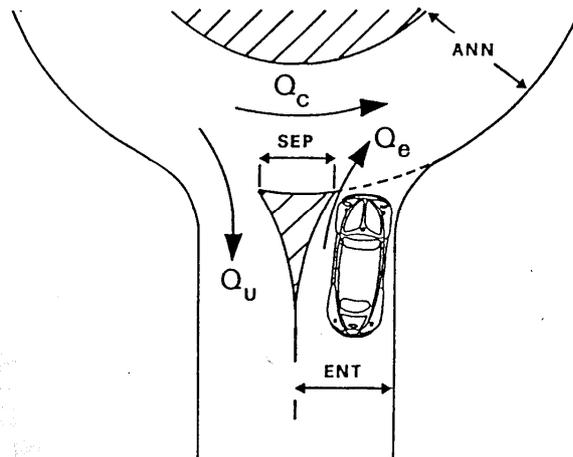
- oggetto di studio in molti Paesi negli ultimi decenni seguendo **Kimber** (1980):
 1. relazione lineare fra capacità di un braccio e flusso sull'anello in funzione delle caratteristiche geometriche attraverso l'analisi statistica, condotta con tecniche di regressione su rotatorie convenzionali e compatte;
 2. condizionanti soprattutto la larghezza della sezione trasversale corrente del braccio e quella della sezione allargata in corrispondenza dell'immissione.
- i metodi di calcolo della capacità nei diversi Paesi, riconducibili tutti ad uno stesso schema fondamentale, differiscono perché diverse sono le tipologie di rotatoria su cui sono stati misurati i dati sperimentali, ma soprattutto per la diversità dei comportamenti degli automobilisti;
- la relazione tra flusso entrante e flusso circolante sull'anello è possibile:
 1. con approcci empirici (regressione sui moltissimi dati raccolti porta valutazioni prossime a quelle reali determinando l'influenza statistica e non logica della geometria sull'utente); Kimber, francesi e svizzeri;
 2. con approcci teorici (teoria dell'accettazione dei varchi in funzione della geometria, fondata su semplicistiche ipotesi sul comportamento dei conducenti in modo da richiedere meno dati e considerando i conducenti uguali fra loro; tuttavia tale approccio semplificato risulta utile nella pianificazione).

Il calcolo della capacità delle rotatorie secondo la prenormativa italiana

- metodo messo a punto in Francia nel 1987 dal SETRA,
- la capacità e i flussi sono misurati in autovetture equivalenti per ora (eph), valutati per periodi di rilevazione di 15 minuti sulla linea di DARE PRECEDENZA, tramite i coefficienti di conversione proposti dalle Norme Svizzere:
 - 1 ciclo o motociclo sull'anello 0,8 autovetture
 - 1 ciclo o motociclo in ingresso 0,2 autovetture
 - 1 veicolo pesante 2,0 autovetture
 - 1 autobus 2,0 autovetture
- definisce una relazione lineare fra capacità e un *traffico complessivo di disturbo*, (flusso che percorre l'anello e quello in uscita sullo stesso ramo);

- il parametro geometrico fondamentale per il calcolo della capacità è la larghezza ENT , valutata dietro la prima autovettura ferma alla striscia del DARE PRECEDENZA, ed in particolare lo scarto di rispetto ad una larghezza standard di 3,5 m.

Il metodo adottato per il calcolo della capacità di una generica rotatoria



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

- 1) si calcola il traffico uscente equivalente Q'_u come funzione di Q_u e di SEP :

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

assumendo $Q'_u = 0$ se $SEP \geq 15$ m.

- 2) si determina il traffico di disturbo Q_d come funzione di Q_c , di Q'_u e di ANN :

$$Q_d = (Q_c + 2/3Q'_u)[1 - 0.085(ANN - 8)] \quad (\text{eph}) \quad (3)$$

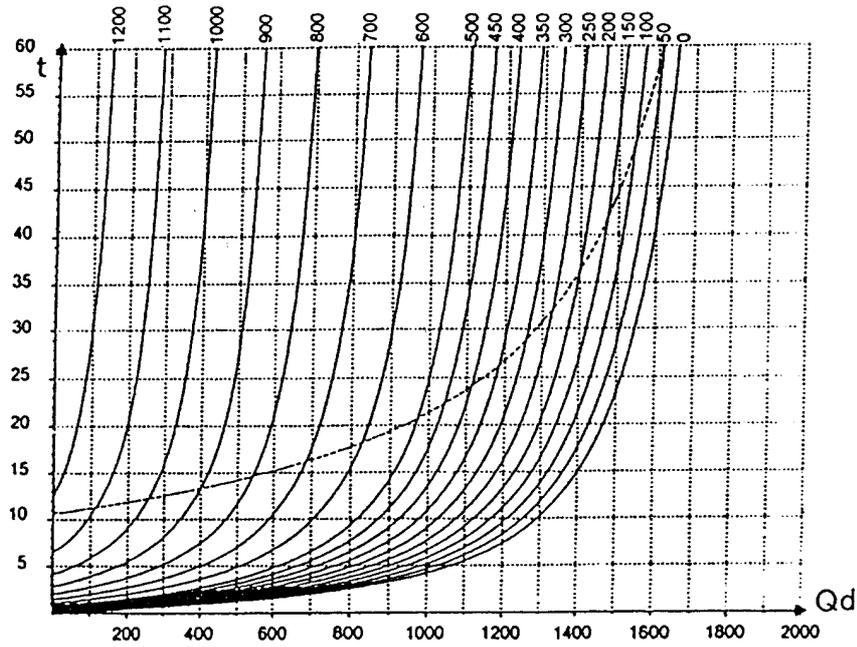
- 3) si calcola quindi la capacità K del braccio mediante la relazione:

$$K = (1330 - 0.7Q_d)[1 + 0.1(ENT - 3.5)] \quad (\text{eph}) \quad (4)$$

- 4) si usa definire un flusso entrante equivalente Q'_e , il quale eguaglia la capacità di un braccio largo 3,5 m quando questa viene raggiunta dal flusso Q_e su un braccio della rotatoria avente la larghezza effettiva ENT :

$$Q'_e = \frac{Q_e}{1 + 0.1(ENT - 3.5)} \quad (5)$$

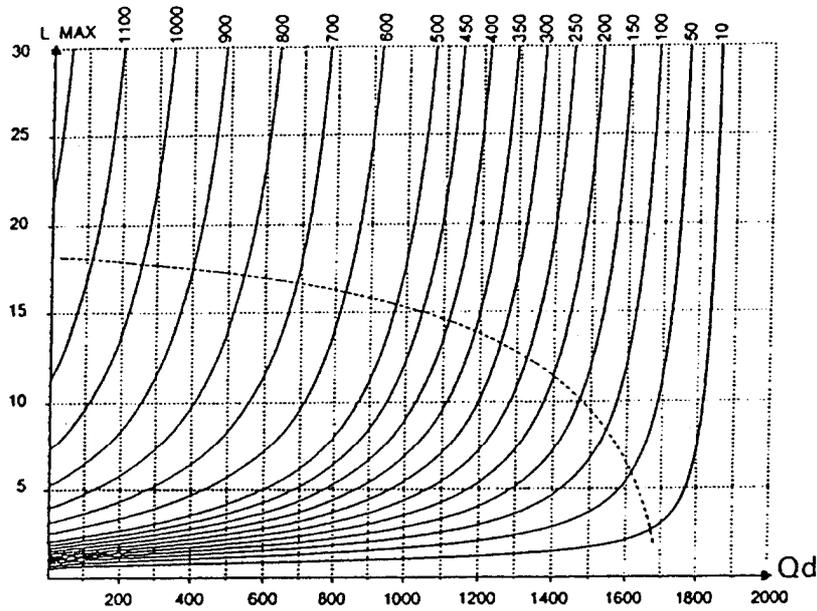
Parametro: Q' (traffico in ingresso rapportato ad una entrata di 3,5 m)



La curva punteggiata indica il limite corrispondente alla capacità pratica Q_{e-150}

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

Parametro: Q' (traffico in ingresso rapportato ad una entrata di 3,5 m)



La curva punteggiata indica il limite corrispondente alla capacità pratica Q_{e-150}

99° percentile del numero medio di veicoli in attesa su un braccio di rotatoria (in eph)

5. si calcola la capacità semplice ricercando quello scalare δ_i che dà luogo ad un flusso $\delta_i Q_{e,i}$ entrante dal braccio i uguale alla capacità K_i del braccio quale si ricava dalla (4), con $K = \delta_i Q_{e,i}$ e $Q_d = \delta_i Q_{d,i}$. Sia δ_j il più piccolo dei valori ottenuti fra tutti i bracci, relativo al braccio j . Risulta $K_j = \delta_j Q_{e,j}$ la capacità semplice della rotatoria, la quale viene raggiunta sul solo braccio j quando la matrice M , e quindi i flussi in ingresso, sono moltiplicati per δ_j , mentre i flussi in ingresso dagli altri bracci della rotatoria si mantengono al disotto della capacità;
6. la capacità totale della rotatoria si calcola determinando i valori dei flussi in ingresso che, distribuendosi fra le varie uscite secondo la matrice M , determinano il contemporaneo raggiungimento della capacità su tutti i bracci. Questi flussi in ingresso si ricavano risolvendo il sistema di m equazioni lineari nelle m incognite $Q_{e,i}$ ottenuto scrivendo la (4) per i singolo bracci, e ponendo in essa $K = Q_{e,i}$ mentre Q_d viene espressa in funzione di $Q_{e,j} \forall j \neq i$ utilizzando le (2), (3). La capacità totale Q della rotatoria è quindi
- $$Q = \sum_{i=1}^m Q_{e,i} ;$$
7. i valori $Q_{e,i}$ di capacità dei singoli bracci che concorrono alla capacità totale vengono posti a base della progettazione di una rotatoria. Poiché però flussi in ingresso di tali entità determinerebbero la presenza permanente di veicoli in attesa ai bracci, si fa riferimento ad una *capacità pratica* dei singoli bracci data da $K_i = Q_{e,i} - 150$, ovvero
- $$K_i = 0.8Q_{e,i} .$$

NOTA BENE:

Si può considerare corretta una riserva di capacità tra il 25 e l' 80 % $(C_e - Q_e)/C_e$:

- una riserva troppo elevata su un'entrata principale deve indurre a verificare se la sua larghezza (o il numero delle corsie) non sia sovradimensionata;
- se tutte le entrate hanno una riserva di capacità molto ampia, si può arrivare talvolta a ridurre la larghezza dell'anello;

- se la riserva di capacità è esigua (dal 5% al 25%) occorrerà fare attenzione ai tempi di attesa e alla lunghezza delle code (vicinanza di un altro incrocio, di una zona di limitata visibilità, o di un punto particolare);
- se la riserva di capacità è inferiore al 5%, e a maggior ragione se essa è negativa, sono da temere forti perturbazioni, e si deve migliorare la capacità: allargamento delle entrate; allargamento dell'isola separatrice se il traffico in uscita ha una forte influenza; allargamento dell'anello.

Il metodo adottato per il calcolo della capacità semplice di una rotatoria urbana medio-grande (raggio interno da 10 a 30 m), con entrate a 1 sola corsia per senso di marcia, con buona disposizione dei bracci e una ripartizione equilibrata del traffico:

$$Q_e = \gamma(1500 - 0.83Q_d) \text{ eph} \quad (22)$$

□ $\gamma = 1$ per ingressi a una corsia, $\gamma = 1.5$ per ingressi a due e a più corsie.

$$Q_d = bQ_c + 0.2 \quad (23)$$

□ dove $b = 1$ per $ANN < 8$ m; $b = 0.7$ per $ANN \geq 8$ m e $R \geq 20$ m; $b = 0.9$ se $ANN \geq 8$ m e $R < 20$ m.

□ formula semplificata per avere dei riferimenti progettuali.

Un'applicazione del metodo per il calcolo della capacità di una generica rotatoria a quattro bracci numerati in senso antiorario

- per tutti i bracci: $ANN = 8$ m, $ENT = 6$ m, $SEP = 15$ m;
- la matrice N di distribuzione

$$N = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.18 & 0.65 & 0.17 \\ 0.20 & 0.00 & 0.21 & 0.59 \\ 0.72 & 0.10 & 0.00 & 0.18 \\ 0.20 & 0.70 & 0.10 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

- la matrice M origine-destinazione si ottiene moltiplicando N per il vettore Q dei flussi entranti:

$$Q = [700 \ 525 \ 310 \ 430] \quad (9)$$

- i flussi uscenti sono:

$$Q_{u,1} = 525 \cdot 0.20 + 310 \cdot 0.72 + 430 \cdot 0.20 = 414 \text{ eph}$$

$$Q_{u,2} = 700 \cdot 0.18 + 310 \cdot 0.10 + 430 \cdot 0.70 = 458 \text{ eph}$$

$$Q_{u,3} = 700 \cdot 0.65 + 525 \cdot 0.21 + 430 \cdot 0.10 = 608 \text{ eph}$$

$$Q_{u,4} = 700 \cdot 0.17 + 525 \cdot 0.59 + 310 \cdot 0.18 = 485 \text{ eph}$$

- i flussi circolanti sono:

$$Q_{c,1} = 430 \cdot (0.70 + 0.10) + 310 \cdot 0.10 = 375 \text{ eph}$$

$$Q_{c,2} = 700 \cdot (0.65 + 0.17) + 430 \cdot 0.10 = 617 \text{ eph}$$

$$Q_{c,3} = 525 \cdot (0.59 + 0.20) + 700 \cdot 0.17 = 534 \text{ eph}$$

$$Q_{c,4} = 310 \cdot (0.72 + 0.10) + 525 \cdot 0.20 = 359 \text{ eph}$$

- sostituendo nelle (2) e (3) si ottiene il traffico complessivo di disturbo:

$$Q_{d,1} = 375 \text{ eph} \quad Q_{d,2} = 617 \text{ eph} \quad Q_{d,3} = 534 \text{ eph} \quad Q_{d,4} = 359 \text{ eph}$$

- i δ_i si ottengono risolvendo rispetto a ciascuno di essi la (4):

$$700\delta_1 = (1330 - 0.7 \cdot 3.75\delta_1) \cdot 1.25$$

$$525\delta_2 = (1330 - 0.7 \cdot 6.17\delta_2) \cdot 1.25$$

$$310\delta_3 = (1330 - 0.7 \cdot 5.34\delta_3) \cdot 1.25$$

$$430\delta_4 = (1330 - 0.7 \cdot 3.59\delta_4) \cdot 1.25$$

$$\delta_1 = 1.62 \quad \delta_2 = 1.56 \quad \delta_3 = 2.14 \quad \delta_4 = 2.24$$

- amplificando i flussi in ingresso per il più piccolo valore di δ_i ($\delta_2 = 1.56$):

$$Q_{e,1} = 700 \cdot 1.56 = 1092 \text{ eph} \quad Q_{e,2} = 525 \cdot 1.56 = 819 \text{ eph}$$

$$Q_{e,3} = 310 \cdot 1.56 = 484 \text{ eph} \quad Q_{e,4} = 430 \cdot 1.56 = 671 \text{ eph}$$

si ha il primo fenomeno di congestione con il raggiungimento della capacità sul braccio 2 $K_2 = 819$ eph, mentre con tali flussi di ingresso la capacità dei bracci (4) è:

$$K_1 = (1330 - 0.7 \cdot 375 \cdot 1.56) \cdot 1.25 = 1151 \text{ eph}$$

$$K_3 = (1330 - 0.7 \cdot 534 \cdot 1.56) \cdot 1.25 = 934 \text{ eph}$$

$$K_4 = (1330 - 0.7 \cdot 359 \cdot 1.56) \cdot 1.25 = 1172 \text{ eph} \quad \text{con riserve di capacità:}$$

$$\Delta K_1 = 1151 - 1.56 \cdot 700 = 59 \text{ eph} \quad \Delta K_3 = 934 - 1.56 \cdot 310 = 450 \text{ eph}$$

$$\Delta K_4 = 1172 - 1.56 \cdot 430 = 501 \text{ eph}$$

- i flussi entranti equivalenti relativi a quelli del vettore (9) si ricavano dalla (5):

$$Q'_{e,1} = 560/1.25 = 448 \text{ eph} \quad Q'_{e,2} = 525/1.25 = 420 \text{ eph}$$

$$Q'_{e,3} = 310/1.25 = 248 \text{ eph} \quad Q'_{e,4} = 430/1.25 = 344 \text{ eph}$$

$$w_1 = 2.5 \text{ sec}$$

$$q_1 = 3$$

$$w_2 = 4.5 \text{ sec}$$

$$q_2 = 4$$

$$w_3 = 1.5 \text{ sec}$$

$$q_3 = 2$$

$$w_4 = 2.0 \text{ sec}$$

$$q_4 = 2$$

- per il calcolo della capacità totale si deve risolvere il sistema lineare di 4 equazioni, ciascuna delle quali è la (4) scritta per un singolo braccio i , ponendo in essa $K = Q_{ei}$ ed esprimendo Q_d in funzione dei flussi entranti dagli altri bracci:

$$Q_{d,1} = 0.80 \cdot Q_{e,4} + 0.10 \cdot Q_{e,3}$$

$$Q_{d,2} = 0.82 \cdot Q_{e,1} + 0.10 \cdot Q_{e,4}$$

$$Q_{d,3} = 0.79 \cdot Q_{e,2} + 0.17 \cdot Q_{e,1}$$

$$Q_{d,4} = 0.82 \cdot Q_{e,3} + 0.20 \cdot Q_{e,2}$$

$$Q_{e,1} = 983 \text{ eph} \quad Q_{e,2} = 878 \text{ eph} \quad Q_{e,3} = 909 \text{ eph} \quad Q_{e,4} = 857 \text{ eph}$$

per cui la capacità totale risulta eguale a $Q = 3627$ eph.

- la capacità pratica dei bracci si ottiene moltiplicando i valori precedenti per 0.8:

$$\hat{Q}_{e,1} = 786 \text{ eph} \quad \hat{Q}_{e,2} = 702 \text{ eph} \quad \hat{Q}_{e,3} = 727 \text{ eph} \quad \hat{Q}_{e,4} = 686 \text{ eph}$$

e la capacità pratica totale è $\hat{Q} = 2901$ eph.

Il calcolo della capacità delle rotatorie in Svizzera

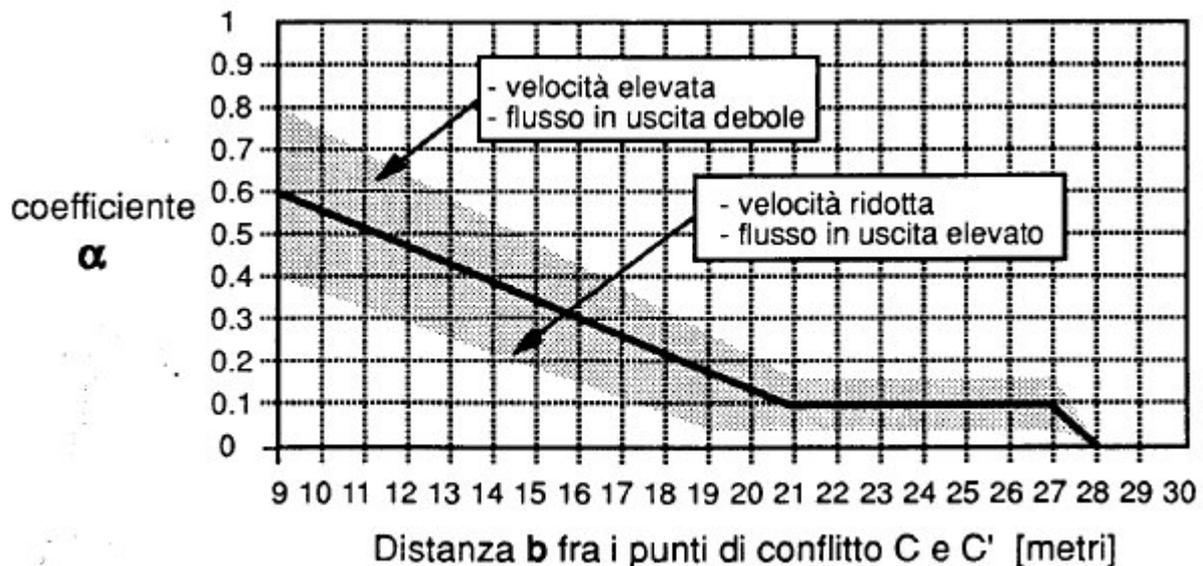
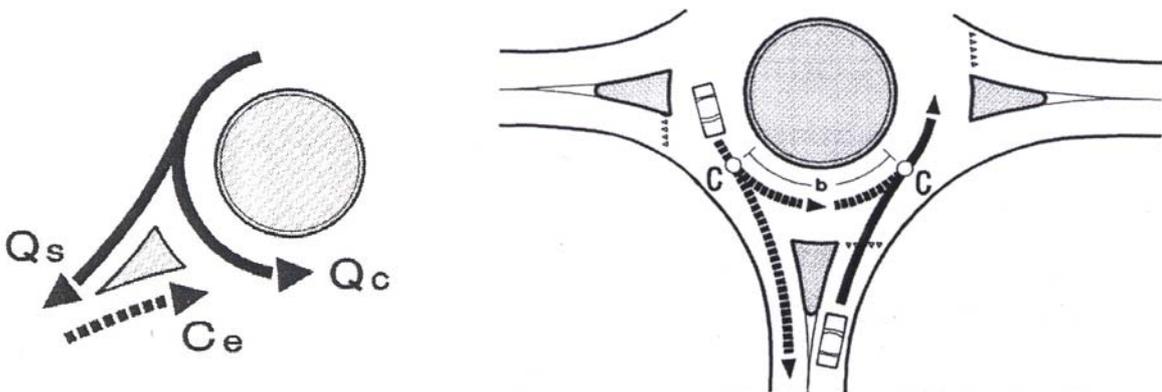
- rotatorie compatte D 26-40 metri con anello ed entrate ad una sola corsia, con ipotesi di capacità di corsia pari a 1500 eph;
- il flusso in uscita non incide sulla capacità in ingresso in una rotatoria, che invece dipende linearmente dal flusso in circolazione a destra dell'ingresso;
- la capacità di un'entrata C_e calcolata in eph è definita dalla formula di Bovy:

$$C_e = 1500 - 8/9 Q_g \quad (\text{eph})$$

$$Q_g = Q_c + \alpha Q_s \quad (\text{eph})$$

Q_g = portata dei flussi di veicoli ingombranti (eph) o traffico di disturbo (*trafic gé-nant*); dipende dal flusso in circolo e dalla geometria;

α = coefficiente che tiene conto del flusso in uscita, determinato a partire dalla distanza b fra i punti di conflitto C e C' delle traiettorie in uscita e in entrata;



➤ per una rotonda con anello di scorrimento ed accessi a più corsie:

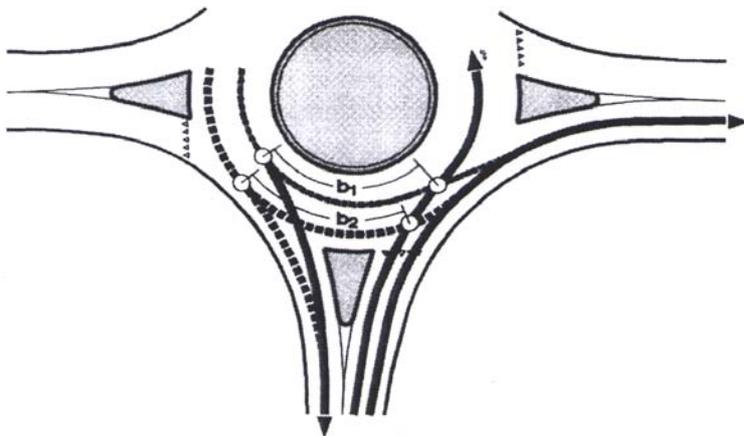
- β = coefficiente di riduzione di Q_c in funzione del numero di corsie sull'anello;

- γ = coefficiente di ripartizione del flusso entrante in funzione del numero di corsie;

$$C_e = 1500 - 8/9 Q_g \text{ (eph)}$$

$$Q_g = \beta Q_c + \alpha Q_s \text{ (eph)}$$

Caso	β	Caso	γ
1 corsia sull'anello	0,9-1,0	1 corsia in entrata	1,0
2 corsie sull'anello	0,6-0,8	2 corsie in entrata	0,6-0,7
3 corsie sull'anello	0,5-0,6	3 corsie in entrata	0,5



Nel caso di rotonde a due corsie in entrata ed a una o due corsie sull'anello conviene scegliere la distanza b più vincolante (la minore) per la scelta di α (la distanza b_1).

➤ per rotatorie urbane con D 25-40 m la capacità di un ingresso ad una sola corsia C_{e1} con condizioni di traffico e geometria standard:

$$C_{e1} = 1300 - 0,75 Q_c \text{ (eph)}$$

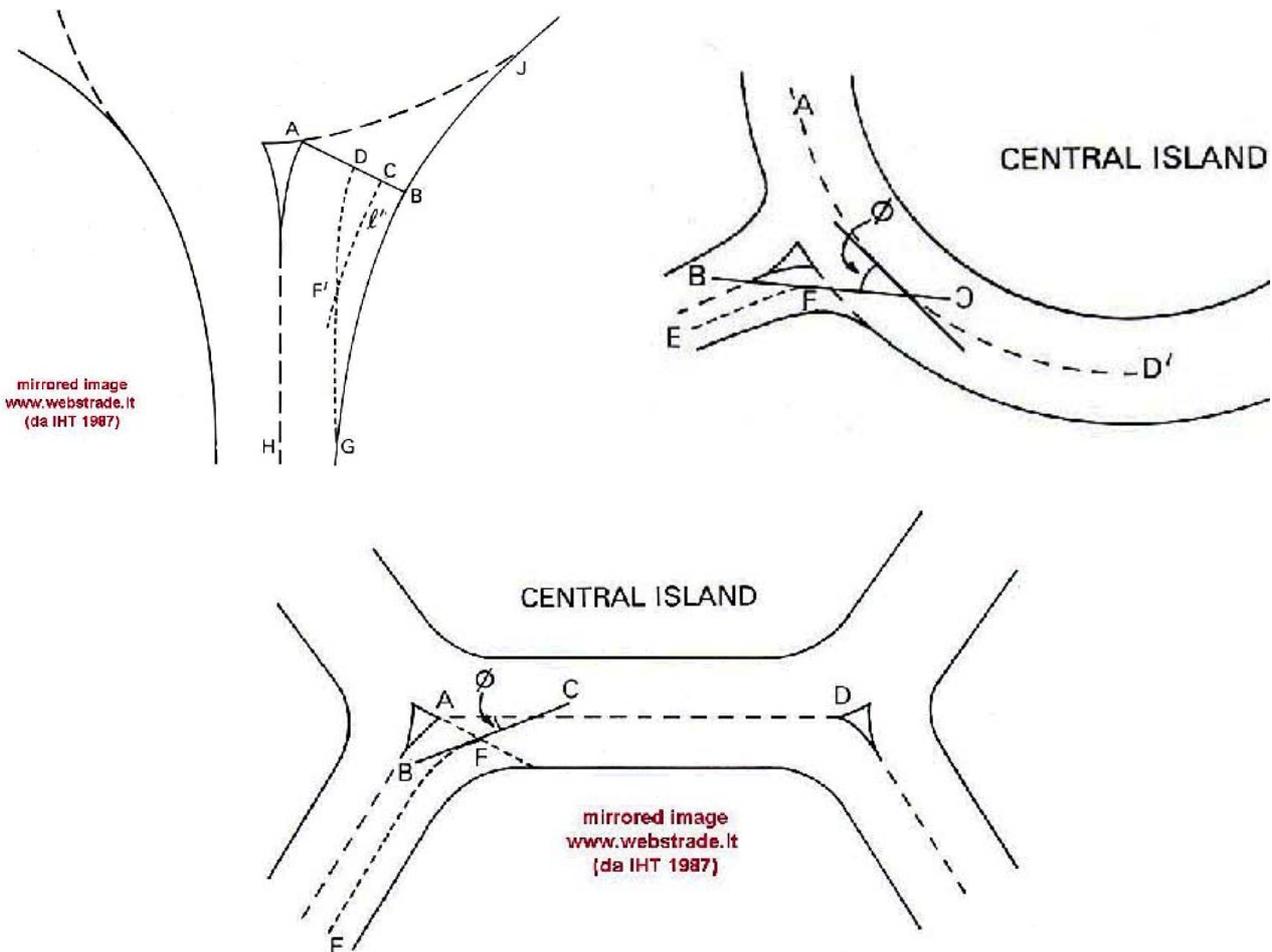
➤ per rotatorie urbane con D 25-40 m, una corsia sull'anello, una corsia sull'entrata più quelle riservate ai mezzi pubblici, o entrata allargata ma non suddivisa in due corsie, con flussi in entrata elevati, superiori ai 1000 eph

$$C_{e1} = 1450 - 0,95 Q_c \text{ (eph)}$$

➤ la capacità su un braccio a due corsie si ottiene moltiplicando C_{e1} per il coefficiente 1,4.

Il calcolo della capacità delle rotatorie in Gran Bretagna

- Kimber nel 1980 ricavò una relazione empirica che lega in modo lineare la capacità di un braccio al flusso che percorre l'anello, in funzione delle caratteristiche geometriche della rotatoria:
- l'ampiezza dell'entrata (e) in corrispondenza dell'intersezione perpendicolarmente;
 - l'ampiezza della semicarreggiata di entrata (v) a monte della svasatura;
 - il raggio di entrata (r), che è il minimo raggio di curvatura del cordolo esterno;
 - il diametro del cerchio inscritto (D); ove l'area disponibile è asimmetrica si usa un valore locale nella zona dell'entrata;
 - la lunghezza media della svasatura (l'); nella figura $l'=CF'$, dove CF' è parallela al bordo strada BG e a distanza media $(e-v/2)$ dal bordo;
 - la velocità di variazione della sezione di entrata (S, *sharpness*) definita da $S=1,6 (e-v)/l'$;
 - l'angolo di immissione delle correnti di traffico entranti rispetto al traffico circolante in rotatoria (ϕ);



- il diametro del cerchio inscritto, per valori minori di 50 m, ha un effetto relativamente piccolo rispetto agli altri parametri; il raggio di entrata ha un effetto ridotto sulla capacità nel caso di rotonde di diametro maggiore o uguale a 20 m; l'uso di entrate perpendicolari (70 gradi o più) e di piccoli raggi di entrata (meno di 15 m) riduce la capacità;
- per rotonde urbane compatte e per rotonde urbane ed extraurbane ad una sola corsia con diametri del cerchio inscritto variabili tra 25 m e 55 m:

$$Q_e = K(F - f_c Q_c) \quad f_c Q_c \leq F$$

$$Q_e = 0 \quad f_c Q_c > F$$

$$k = 1 - 0.00347(\phi - 30) - 0.978\left(\frac{1}{r} - 0.05\right) \quad F = 303x_2 \quad f_c = 0.210t_D(1 + 0.2x_2)$$

$$t_D = 1 + \frac{0.5}{1 + \exp\left(\frac{D - 60}{10}\right)}$$

$$x_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2S} \quad S = \frac{1.6(e - v)}{l'}$$

dove i parametri e, v, l', D ed r sono espressi in metri, S in metri/metri e ϕ in gradi. Se $e=v$ l' va a zero, ma ciò dà S indefinito perciò si assume un valore di l' diverso da zero.

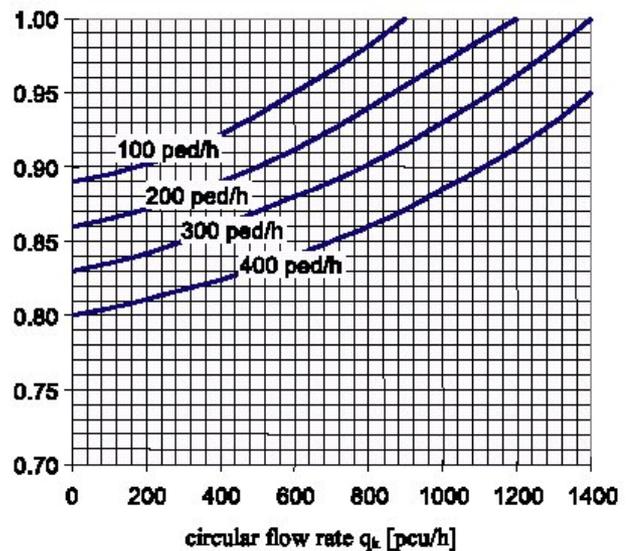
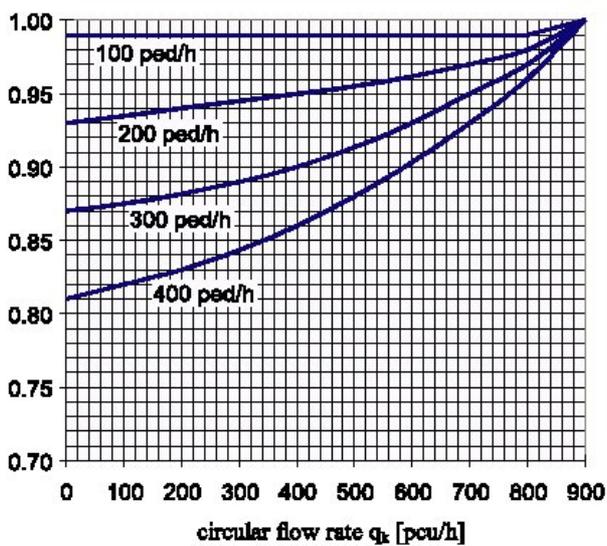
Ottenuta la larghezza effettiva dell'entrata x_2 , venne introdotto f_c per tenere conto del fatto che con il crescere del diametro cresce la capacità, anche se con effetti via via inferiori.

Il calcolo della capacità delle rotatorie negli Stati Uniti

- tramite metodi stranieri; tuttavia nessuno può dirsi certo dell'efficacia di questi metodi, molto efficaci all'estero, perché le caratteristiche e i comportamenti dei conducenti giocano un ruolo importante;
- per rotatorie urbane compatte e per rotatorie urbane ed extraurbane ad una sola corsia con diametri del cerchio inscritto variabili tra 25 m e 55 m, si usa la relazione di Kimber;
- la capacità delle minirotatorie:

$$Q_e = 1218 - 0.74Q_c.$$

- se il volume di passaggio pedonale e il volume circolante sono conosciuti, la capacità veicolare può essere moltiplicata per un certo fattore M, che assume diversi valori per rotatorie ad una o due corsie; si noti che l'impedenza dei pedone decresce come l'incremento dei volumi veicolari.



Il valore di M nel caso di rotatorie ad una e due corsie

Un confronto fra le formule adottate nei diversi Paesi

- le formule inglesi danno capacità maggiori per la diversa filosofia progettuale: isole centrali minori, minore deflessione e entrate con allargamenti che permettono ai conducenti di guidare più velocemente, con forti incrementi di capacità, ma anche di incidenti;
- per rotatorie ad una sola corsia con diametro di 50 m, larghezza di entrata di 5 m, corsia della strada di approccio di 4,5 m, anello di 5 m, raggio di entrata 40 m, angolo di entrata di 60°, lunghezza dell'allargamento pari a 30 m.

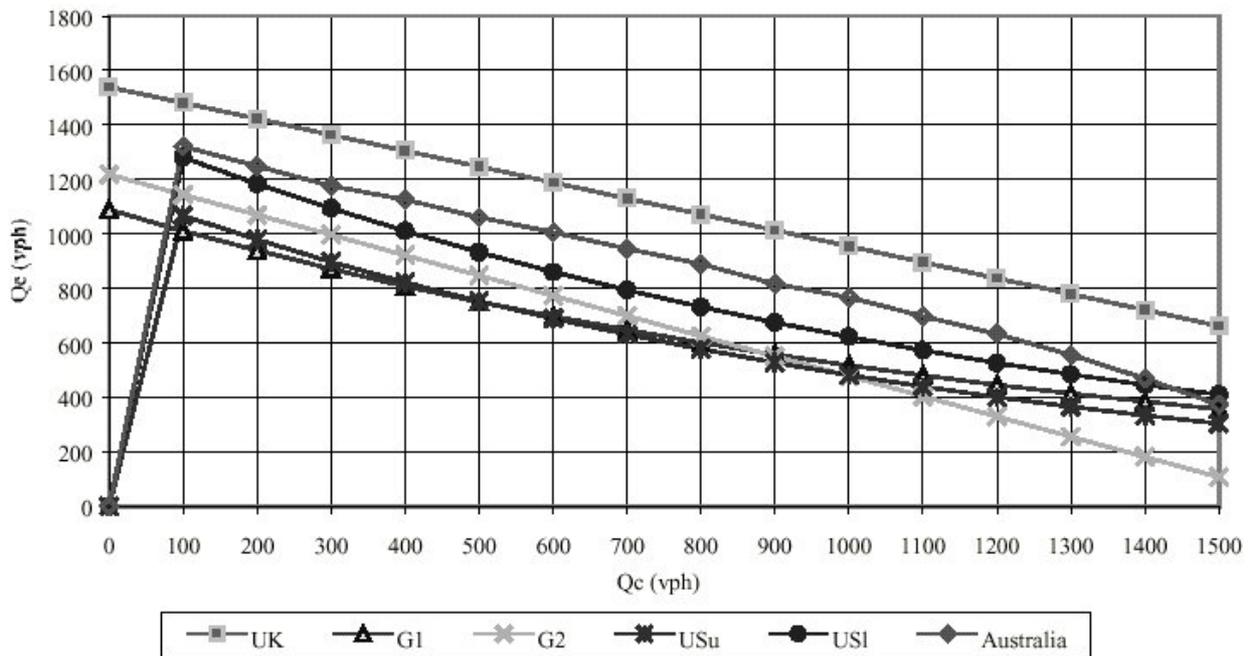
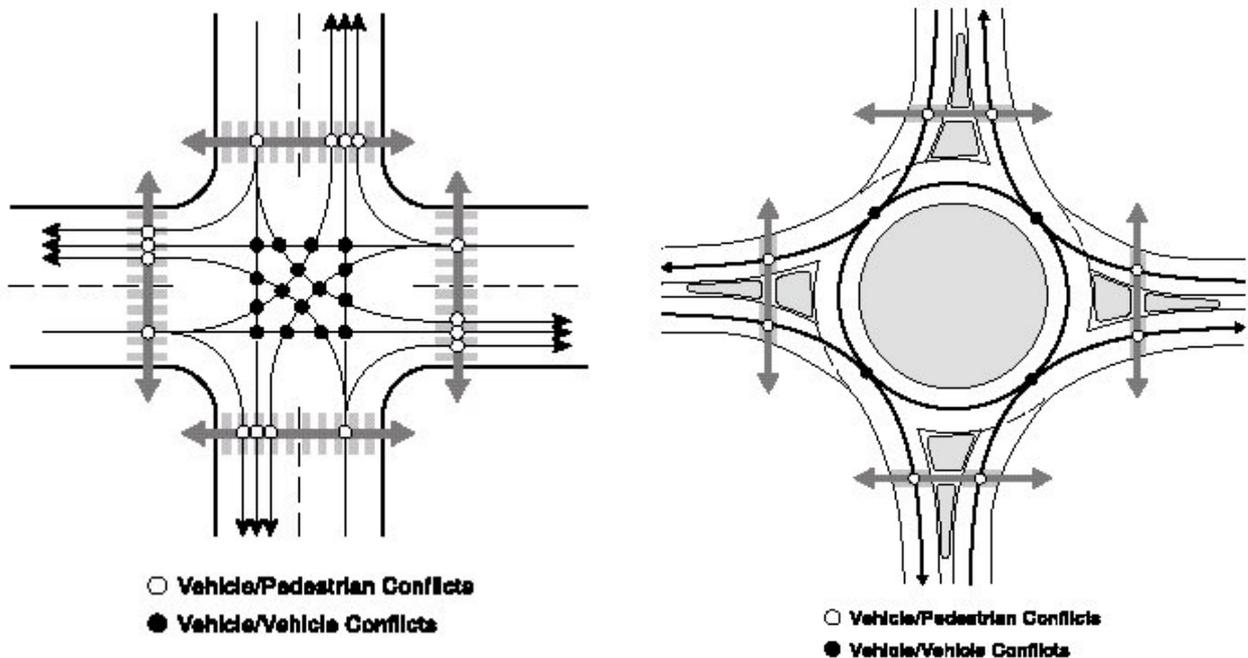


Table 6.15: Entering Capacity Comparison

Qc	UK	G1	G2	USu	USl	Aust
0	1539	1089	1218	0	0	0
100	1481	1011	1144	1067	1280	1321
200	1422	939	1070	979	1184	1248
300	1364	872	996	898	1094	1176
400	1305	809	922	823	1011	1126
500	1247	751	848	754	933	1061
600	1189	698	774	690	861	1005
700	1130	648	700	632	794	945
800	1072	601	626	578	733	891
900	1013	558	552	528	675	818
1000	955	518	478	482	623	768
1100	897	481	404	440	573	699
1200	838	447	330	402	527	633
1300	780	415	256	366	485	556
1400	721	385	182	334	446	469
1500	663	357	108	304	411	373

Note: Q_c = Circulating flow (vph); UK = Eq. 6.6; G1 = Eq. 6.7; G2 = Eq. 6.8; USu = Eq. 6.22 upper bound; USl = Eq. 6.22 lower bound; Aust = Eq. 6.11.

I percorsi pedonali in intersezioni a raso di tipo rotatorio



Confronto fra i punti di conflitto pedone-veicolo in corrispondenza di intersezioni lineari e rotatorie

- facilitazione progettuale perché hanno meno punti di conflitto;
- bilanciare le convenienze e la sicurezza dei pedoni con le prestazioni delle rotatorie: i pedoni vogliono attraversare il più vicino possibile all'intersezione e perciò potrebbero scegliere un percorso minore ma più pericoloso; ai fini della sicurezza bisogna allontanare gli attraversamenti dalle linee di DARE PRECEDENZA perché in loro corrispondenza i conducenti guardano a sinistra per cercare un varco;
- la distanza di attraversamento sia ridotta per minimizzare l'esposizione al traffico dei pedoni mediante isole direzionali;
- attraversamenti non troppo lontani dall'intersezione perché richiede isole più lunghe;
- arretrato rispetto al bordo esterno dell'anello, in modo che i pedoni possano passare dietro la prima vettura ferma in attesa perché gli automobilisti si concentrano soprattutto sulla corrente del traffico;
- in caso di elevato traffico pedonale, regolazione semaforica specifica per i soli pedoni con attraversamento arretrato di qualche decina di metri rispetto all'anello e i tempi di attraversamento contenuti per evitare un riflusso sulla corona giratoria;

- le rotatorie di grandi dimensioni ($D > 60$ m) generano insicurezza (soprattutto con entrate e uscite a più corsie), allungamento di percorsi (effetto barriera): vanno usate solo in area extraurbana, con forti volumi di traffico;
- passaggio pedonale rialzato per ridurre la velocità delle macchine a meno di 20 km/h presso l'attraversamento (non previsto in Italia).

La normativa italiana:

1. larghezza e lunghezza isola compatibili con arresto di un pedone con carrozzina;
2. l'attraversamento pedonale arretrato di 4-5 m rispetto al bordo esterno dell'anello;
3. i pedoni siano dissuasi da attraversare o impegnare l'anello mediante:
 - elevata qualità e sicurezza dei percorsi pedonali lungo la corona esterna;
 - ostacoli appropriati lungo i bordi (piantagioni, vasi da fiori, paracarri, catene, ecc..) da non cingere impedendo una via di fuga;
4. eccezionalmente sottopassi pedonali, anche in senso diametrale per fruire dell'isola centrale.

La normativa francese:

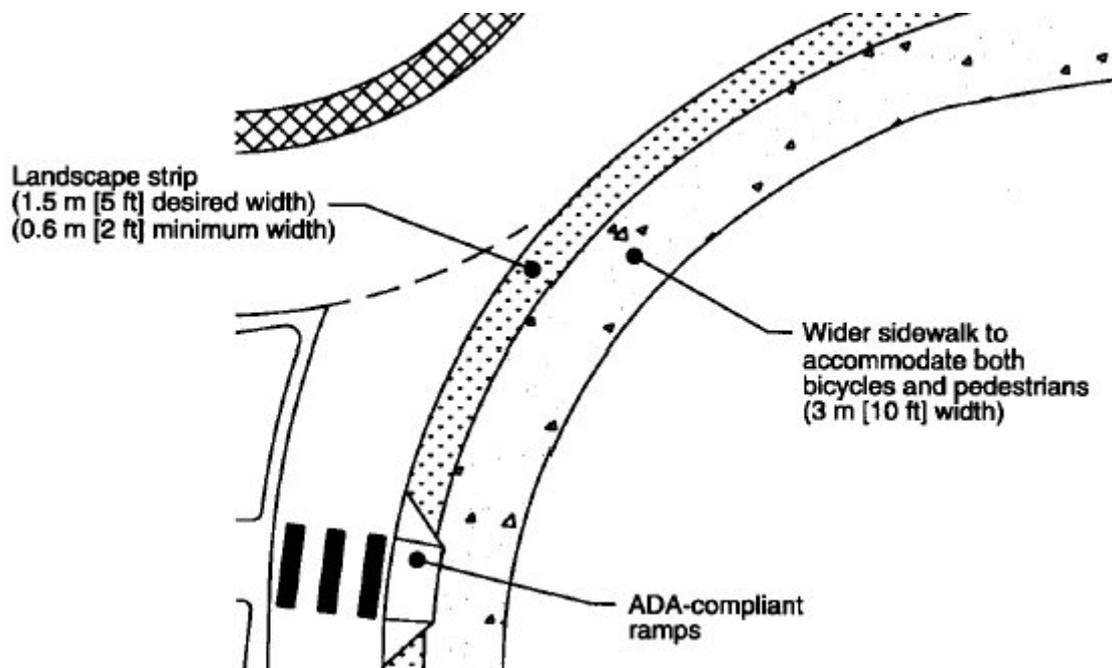
- ❑ distanza dalla linea di DARE PRECEDENZA 2 m per le minirotatorie; 5 m per le grandi rotatorie; le uscite vengono ritenute più pericolose perciò l'arretramento (3 - 10 m) deve permettere lo stoccaggio di un veicolo in attesa: gli attraversamenti pedonali sulle entrate e sulle uscite possono essere sfalsati;
- ❑ su anelli di grandi dimensioni, ormai piazze, in un'area urbana densa sarà possibile garantire l'attraversamento prima delle uscite, non dopo un'entrata; la carreggiata anulare è larga 9 m o più, è ipotizzabile un semaforo a chiamata sull'anello.

La normativa inglese:

- ❑ l'attraversamento almeno 10 m indietro rispetto alla linea di DARE PRECEDENZA;
- ❑ con alti flussi di pedoni e di veicoli e specialmente sulle strade primarie con alte velocità, possibili sottopassi o passerelle pedonali, fino a una rete di percorsi pedonali a livello inferiore o superiore.

La normativa statunitense:

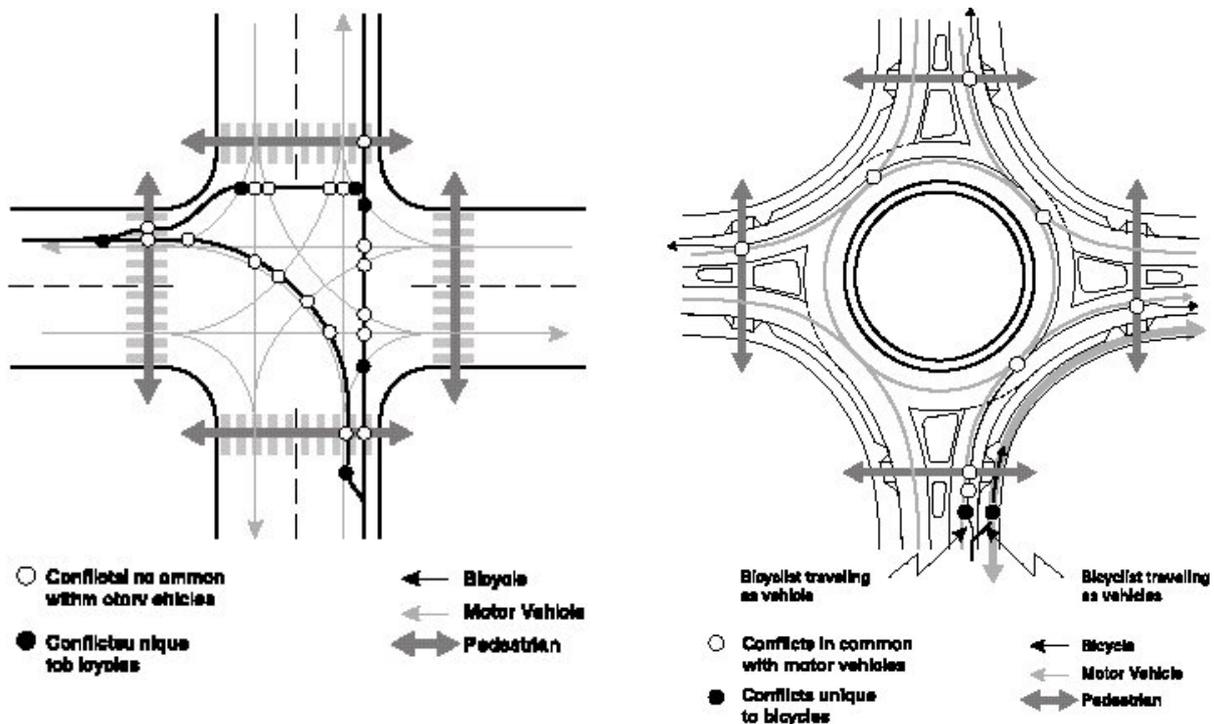
- il rifugio pedonale dovrebbe essere largo almeno 1,8 m per ospitare le persone con passeggini o biciclette; dovrebbe essere a raso piuttosto che rialzato, eliminando la necessità di rampe per le sedie a rotelle;



- nelle rotatorie con una sola corsia gli attraversamenti vanno disposti ad una macchina di distanza dalla linea di arresto (7,5 m); in quelle a doppia corsia a una, due o tre macchine di distanza (7,5 m, 15 m o 22,5 m);
- dovrebbero essere previste delle rampe agli estremi degli attraversamenti per raccordarli con i marciapiedi;
- è raccomandato porre una superficie di avvertimento sul rifugio pedonale nell'isola di separazione: semisfere di diametro nominale di 23 mm, un'altezza nominale di 5 mm, e una distanza fra i centri di 60 mm, di materiale a contrasto cromatico con la pavimentazione stradale; tale superficie inizi al limite del cordolo e si estenda nell'isola per 60 cm;
- platee rialzate solo sulle strade di approccio con velocità < 55 km/h;
- quando possibile, i marciapiedi dovrebbero essere separati dall'anello (per almeno 0,6 m, anche tramite arredo a verde) per scoraggiare i pedoni dall'attraversare l'anello stesso, soprattutto quando è presente un monumento nell'isola.

I percorsi ciclabili in intersezioni a raso di tipo rotatorio

- le rotatorie sono punti di alta incidentalità per i ciclisti, soprattutto per il rifiuto di dare loro la precedenza da parte degli automobilisti: le rotatorie piccole con le entrate allargate sono le più pericolose, mentre le rotatorie larghe sono le più temute dai ciclisti, perciò spesso preferiscono percorrere i marciapiedi;



- ad una rotatoria i ciclisti possono scegliere se viaggiare come pedoni o come veicoli: quando viaggiano come veicoli, i ciclisti incorrono in un potenziale conflitto con i veicoli esistenti dove i ciclisti continuano a circolare attorno alla rotatoria (segnalazioni mediante braccia), soprattutto in rotatorie a doppia corsia; un conflitto aggiuntivo pedone-ciclisti si presenta al punto in cui i ciclisti salgono sul marciapiede;

Sistemazioni:

- corsie ciclabili sul limite esterno dell'anello, magari con particolari cromatismi;
- permettere ai ciclisti di insinuarsi nel traffico dei veicoli a motore sia nell'approccio in rotatoria sia sull'anello, soprattutto quando il traffico è ridotto e sulle rotatorie compatte ad una sola corsia di entrata, segnalando la presenza dei ciclisti;
- inserire corsie separate fuori dall'anello quando i volumi ciclabili e veicolari sono alti, in modo da garantire adeguata protezione ai ciclisti; esse attraversano le uscite e le entrate

ad almeno una macchina di distanza dall'anello. In certe nazioni i ciclisti hanno la priorità sui veicoli ingresso e in uscita, specialmente nelle aree urbane (Germania); altre nazioni preferiscono dare la precedenza ai veicoli in rallentamento e porre un segnale di DARE PRECEDENZA per i ciclisti (Paesi Bassi), soprattutto in area extraurbana;

- una sistemazione specifica per i ciclisti, con corsia o pista ciclabile, andrà realizzata anche per dare continuità a percorsi ciclabili esistenti prima e dopo l'intersezione;
- strumenti utili alla riduzione dell'incidentalità fra ciclisti e veicoli: strisce di corsia, segnali di avvertimento, angoli e larghezze di entrata minori, miglioramenti della visibilità dei conducenti (illuminazione pubblica ed eliminazione di alberi o segnali), piccole rotonde dove i conducenti dei veicoli non possono superare i ciclisti, deviazione imposta ai veicoli a motore;



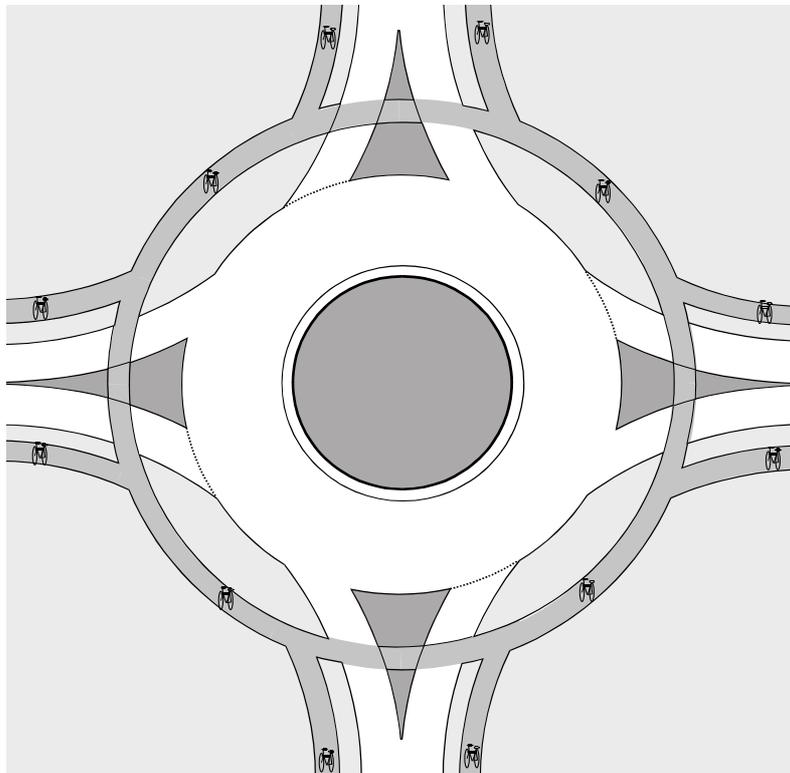
Danimarca- Esempi di rotonda con pista ciclabile separata dalla sola striscia bianca di delimitazione.



- nelle rotonde con un volume superiore ai 10.000 veic/g e in presenza di una pista ciclabile, si consiglia di costruire una separazione rispetto alle corsie veicolari: la divisione con la linea bianca è sconsigliabile, e comunque non è da realizzare in presenza di un volume di traffico superiore ai 10.000 veic/g; occorrono piste ciclabili separate dalle corsie veicolari e protette da isole di sicurezza e/o aiuole spartitraffico.

I percorsi ciclabili e la prenormativa italiana

- in generale, nelle rotatorie non si dovrebbero adottare approntamenti specifici a meno che sui bracci non siano presenti piste ciclabili: la ridotta velocità di esercizio della rotatoria costituisce un fattore di sufficiente sicurezza anche per il traffico a due ruote
- principio derogabile in caso di elevata presenza ciclabile oppure di velocità di esercizio della rotatoria particolarmente alta (oltre 50 km/h)
- traffico ciclabile oltre 800 ciclisti/h nei periodi di punta, oltre cui:
 - creare un reticolo di piste ciclabili indipendente dalle rotatorie, con attraversamenti arretrati di qualche decina di metri rispetto al nodo;
 - disegnare un anello ciclabile dedicato esterno che intercetti le arterie confluenti proteggendo gli attraversamenti collocati nelle isole divisionali e perpendicolari; va adottato per velocità > 50 km/h, mantenendo la precedenza ai veicoli motorizzati e sacrificando la continuità di deflusso delle due ruote;
 - la corsia ciclabile è ritenuta l'ultima opzione perché impone a ciclisti e ciclomotori di attraversare i percorsi dei veicoli a motore. [in Italia la legge 366/1998 prevede l'obbligo di piste ciclabili sia per la costruzione di tutte le nuove strade di tipo C, D, E, F, che per la loro manutenzione straordinaria];



I percorsi ciclabili e la normativa francese

- i ciclisti scelgono se viaggiare nell'anello o su corsie anulari ciclabili di larghezza 1,5 - 2 m, separate da una striscia bianca discontinua e dipinte di colore verde o rosso;



Segnalazione di piste ciclabili in Francia

- le corsie ciclabili realizzate se fanno parte di piste ciclabili che precedono e proseguono oltre la rotonda e nei casi di rotonde con $D > 30$ m (se il diametro è minore si possono avere intersezioni di traiettorie con gli autocarri);
- nelle minirotonde e nelle rotonde compatte non sono necessarie corsie ciclabili sull'anello poiché la velocità dei veicoli non è molto maggiore di quelle delle biciclette, per cui gli automobilisti sono portati a rispettare le biciclette;
- con $D > 40$ m esiste un pericolo per i ciclisti, per la differenza di velocità tra ciclisti e veicoli: si giustifica una banda ciclabile intorno all'anello, soprattutto con un percorso ciclabile che prosegue, ma non ci sono ingressi e uscite con più di due corsie;
- la corsia ciclabile viene prolungata fino all'anello e spesso è caratterizzata da una piccola isola a protezione dei ciclisti mediante la riduzione del raggio di curvatura dei veicoli in entrata;

- sull'uscita è possibile creare dei cordoli a protezione dei ciclisti in uscita e per una migliore identificazione dei ciclisti che proseguono in rotatoria;
- piste ciclabili anulari separate dalla carreggiata anulare e in genere a senso unico quando la circolazione dei ciclisti sull'anello è particolarmente pericolosa, nei casi con $D > 40$ m, e per garantire continuità ad una pista ciclabile che prosegue;
- gli attraversamenti delle piste ciclabili anulari oltre 20 m dalla linea DI DARE PRECEDENZA con precedenza ai veicoli su strada e sfruttando le isole di separazione, con larghezza minima di 2 m per proteggere pedoni e ciclisti;
- gli attraversamenti ciclabili possono essere adiacenti a quelli pedonali, ma rispetto a questi sul lato prossimo alla rotatoria; presso l'attraversamento ciclabile la pista subirà un restringimento;
- se una pista ciclabile che precede la rotatoria deve essere interrotta prima di arrivare all'anello, ciò avvenga a 15-20 m dalla linea di DARE PRECEDENZA in modo che i ciclisti non vadano addosso a camion o bus in svolta a destra in rotatoria;
- una pista viene raccordata direttamente all'anello nei casi di alte percentuali di ciclisti che svoltano a sinistra, di basse velocità dei veicoli a motore e di bassa percentuale di mezzi pesanti in rotatoria;
- poco diffusa la pista ciclabile sfalsata in altezza rispetto alla rotatoria.

I percorsi ciclabili e la normativa olandese

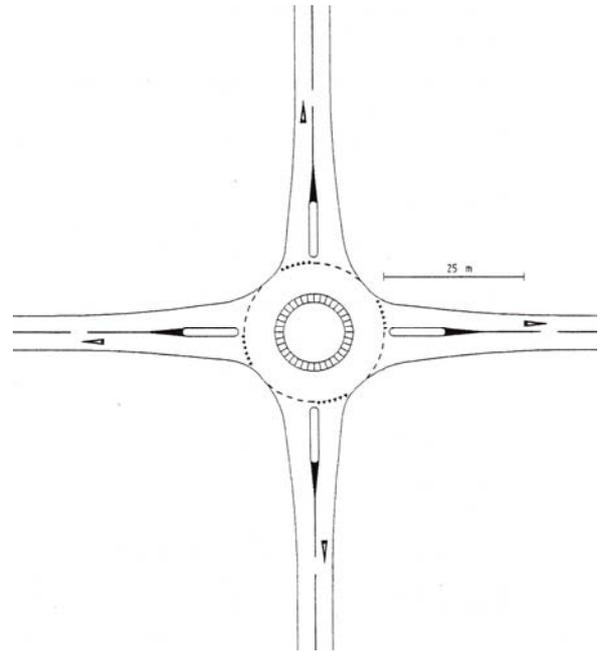
Classificazione

- rotatorie in cui è permesso il mescolamento tra veicoli e ciclisti, quando il volume di traffico è inferiore a 8000 veic/g e i bracci non sono dotati di corsie ciclabili;
- rotatorie con corsie ciclabili, quando il volume di traffico è inferiore a 8000 veic/g e i bracci non sono dotati di corsie ciclabili;
- rotatorie con corsie ciclabili separate in cui i ciclisti hanno la precedenza, quando il volume di traffico è superiore a 10000 veic/g;
- rotatorie con corsie ciclabili separate in cui i ciclisti non hanno la precedenza, quando il volume di traffico è superiore a 10000 veic/g.

Casistica:

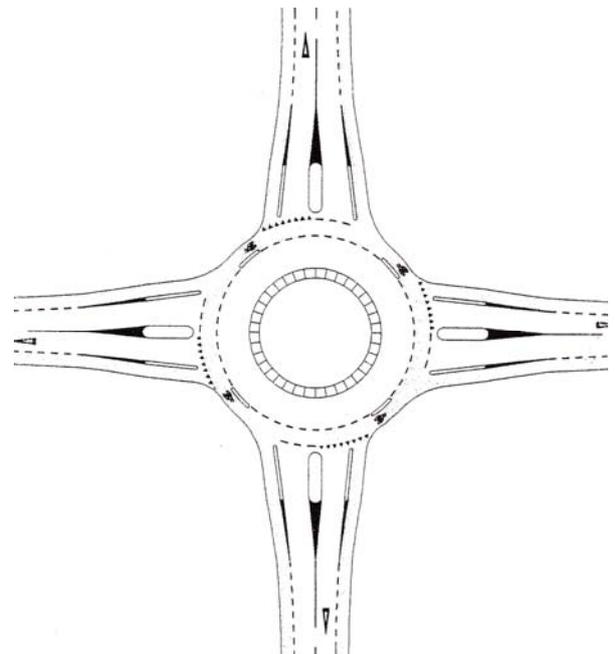
□ *piccole rotatorie (con anello inferiore a 5 m) a traffico misto e velocità moderata:*

1. costringono i veicoli a procedere a velocità moderata (30-40 km/h),
2. assenza di infrastrutture ciclabili;
3. conducenti possono imporre timore sulla concessione della precedenza;
4. punti di conflitto in ingresso e uscita;
5. prevedere altre misure atte ad allertare l'attenzione da parte di chi impegna l'anello: una pavimentazione a contrasto con il conglomerato bituminoso, per colore e per materiale;
6. il flusso di biciclette condiziona la capacità della rotatoria, perché il traffico motorizzato, in alcuni momenti, deve rimanere dietro le biciclette se vuole lasciare l'anello.



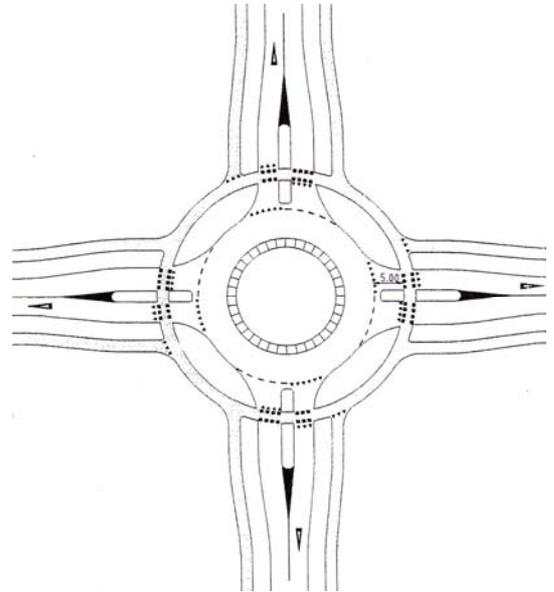
□ *rotatorie con pista ciclabile separata dalla sola striscia bianca di delimitazione*

- 1 il ciclista ha sempre il diritto di precedenza: possibili conflitti con autobus o veicoli alti: il ciclista che continua a percorrere l'anello non è visibile negli specchietti laterali di chi esce;
- 2 evidenziare il fondo del percorso ciclabile con un colore a contrasto o "con occhi di gatto" ogni 5 m;
- 3 poiché i grandi raggi di svolta degli autocarri possono generare confusione nel ciclista e quindi incidenti, alle entrate e alle uscite possono essere introdotte delle isole in rilievo larghe fra 50 e 100 cm, sufficientemente lunghe e segnalate.



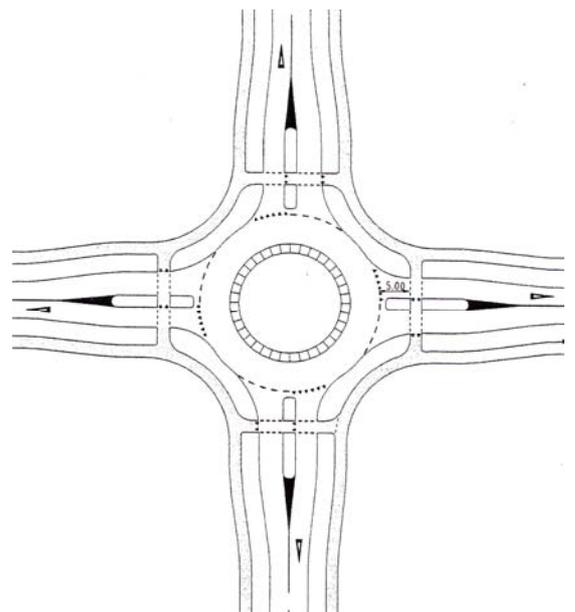
□ *rotatorie con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari equidistante dall'anello e con diritto di precedenza per i ciclisti*

1. le biciclette possono percorrere interamente l'anello ciclabile senza fermarsi con diritto di precedenza: la circonferenza dei ciclisti è parte integrante della rotatoria;
2. punti di conflitto tra biciclette e veicoli in prossimità di accesso e uscita della rotatoria;
3. spazio di almeno 5 m tra l'anello ciclabile e ingresso e uscita dalla rotatoria;
4. i ciclisti percorrono la corsia ciclabile solo in un senso, perché i due sensi di marcia aumenterebbero i punti di conflitto e imponendo l'abolizione del diritto di precedenza per i ciclisti. Inoltre i ciclisti che percorrono l'anello in senso orario, approcerebbero gli automobilisti che entrano ed escono dalla rotatoria in modo inaspettato.



□ *le rotatorie con pista ciclabile separata dalle corsie veicolari e senza diritto di precedenza per i ciclisti*

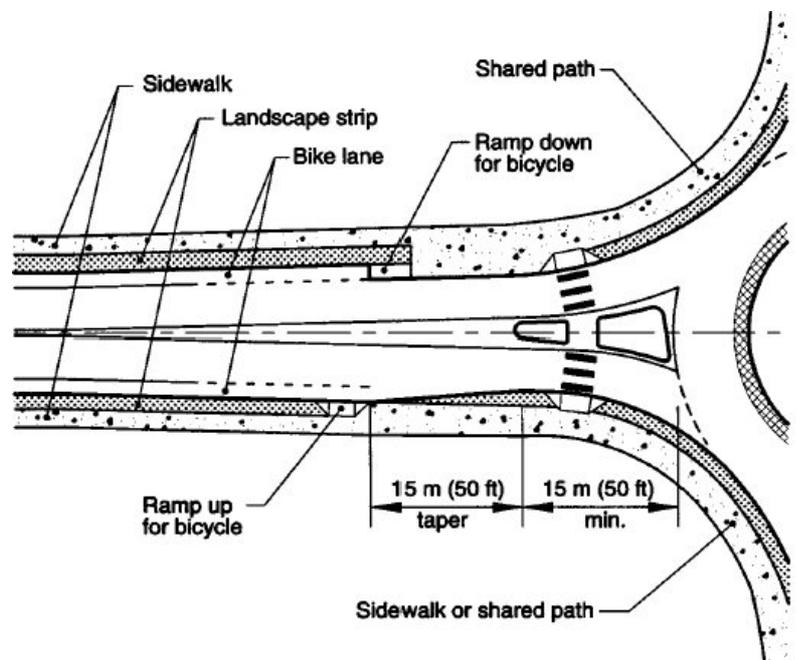
- 1 simili alla rotatoria precedente;
- 2 attraversamento ciclabile perpendicolare a ingressi e uscite ma deve essere segnalato ai ciclisti l'obbligo di dare precedenza;
- 3 consigliabile, affinché il flusso ciclabile non venga bloccato dai veicoli che attendono di entrare in rotatoria, prevedere tra le corsie carrabili della rotatoria e l'anello ciclabile, un'area di 5 m, con la possibilità di rendere l'anello ciclabile utilizzabile nei due sensi di marcia; compensando, con la grande libertà di movimento da parte dei ciclisti, gli effetti negativi dovuti alla perdita del diritto di precedenza e all'allungamento di percorso.



I percorsi ciclabili e la normativa statunitense

- scelta del progettista di trattare i ciclisti come pedoni o veicoli; i ciclisti sono meglio serviti come veicoli, comunque la migliore progettazione presenta entrambe le opzioni;
- per trattare i ciclisti come veicoli, è raccomandato che le corsie ciclabili terminino 30 m a monte della linea di DARE PRECEDENZA per consentire il mescolarsi dei ciclisti con i veicoli: nelle piccole rotatorie con velocità sotto i 30 km/h, dove le velocità dei ciclisti approssimano quelle dei veicoli; inoltre, poiché la velocità tipica dei ciclisti è pari a 20/25 km/h, le caratteristiche geometriche delle rotatorie dovrebbero ridurre le velocità dei veicoli a tali valori: riducendo le curvature e la larghezza alle entrate e curvando i rami dell'intersezione;

- se i ciclisti non vogliono circolare nell'anello devono essere previsti ampi marciapiedi o percorsi misti ciclopedonali separati fisicamente dall'anello, tenendo conto che negli USA i conducenti sono poco avvezzi alle rotatorie e ad un intenso traffico ciclabile;



- i marciapiedi in calcestruzzo larghi circa 1,50 m vengono in genere separati dalla carreggiata da una fascia verde di 1-1,5 m; in caso di intenso flusso pedonale, il percorso promiscuo ciclopedonale diventa largo 3 m e viene ancora accompagnato dalla fascia verde di 1-1,5 m, per un totale di area esterna alla carreggiata di 4-4,5 m;
- previsti scivoli di raccordo conformi alle norme ADA (Americans with disabilities Act) o altre strutture di collegamento tra i percorsi ciclopedonali e le corsie ciclabili;
- prestare attenzione nel posizionare le rampe per i ciclisti per non essere mal interpretate come passaggi pedonali non segnalati;
- le entrate nei percorsi ciclopedonali non dovrebbero permettere ai ciclisti di entrarvi a velocità eccessive.