

MODELLO DI CAPACITÀ E VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI PER LE ROTATORIE A TURBINA

GIUFFRÈ O., GUERRIERI M., GRANÀ A.

D.I.I.V. – Università degli Studi di Palermo

SOMMARIO. L'evoluzione più recente delle intersezioni a rotatoria si è indirizzata verso schemi cosiddetti a turbina (turborotatorie) con l'obiettivo di garantire condizioni di sicurezza più elevate rispetto agli schemi tradizionali. I pochi esempi di realizzazione delle rotatorie a turbina non hanno tuttavia finora consentito di sviluppare metodi di analisi delle condizioni operative e modelli di capacità che possano vantare una validazione attraverso osservazioni di campo. In ogni caso, l'approccio teorico allo studio funzionale delle turborotatorie presenta aspetti decisamente più complessi di quelli delle rotatorie convenzionali sia a causa delle traiettorie dei flussi in ingresso (costretti ad immettersi in corsie fisicamente separate) sia per la configurazione a turbina della carreggiata anulare e del regime delle precedenze che si stabilisce all'ingresso in rotatoria. Ne risultano profondamente modificati, rispetto alle rotatorie convenzionali, gli schemi di conflitto tra flusso entrante e flusso di contrasto e, di conseguenza, i modelli di capacità applicabili e gli stessi criteri per la valutazione delle prestazioni dell'intersezione. A partire da queste considerazioni, tenuto conto dello stato delle conoscenze, nella presente memoria si propone un criterio di valutazione della capacità delle turborotatorie basato su alcune formulazioni esistenti per le intersezioni regolate dal segnale di precedenza, per le quali è possibile far riferimento alla teoria del gap acceptance. Pur con i limiti di una trattazione esclusivamente teorica, i principali obiettivi dell'approccio seguito sono: i) determinare il dominio di convenienza (in termini capacitivi) delle rotatorie con configurazione a turbina rispetto a quelle convenzionali; ii) valutare indici prestazionali (ritardi, lunghezze delle code e livelli di servizio) più aderenti al reale funzionamento delle turborotatorie.

Keywords: turborotatorie, capacità, ritardi, code, livelli di servizio.

1. Premessa

Le turbo rotatorie si differenziano dagli altri schemi geometrici di intersezione con circolazione rotatoria a causa della separazione fisica delle corsie, sia agli ingressi, sia all'anello, ottenuta mediante l'installazione di cordoli insormontabili; inoltre, ad ogni corsia competono solo, e soltanto, alcune manovre di svolta.

Il termine "turbo" si riferisce alla configurazione planimetrica della rotatoria, simile ad una turbina, ed alle traiettorie veicolari "vorticose" che scaturiscono dalla particolare geometria dell'intersezione.

Il principale vantaggio delle turbo rotatorie, rispetto a quelle canoniche, risiede nella riduzione dei punti di potenziale conflitto la cui numerosità, come ben noto, può influire sulle condizioni di sicurezza dell'intersezione. Andrighettoni e Mauro [1], hanno evidenziato che un'intersezione con configurazione a turbina (contraddistinta da dieci punti di conflitto) permette di conseguire una riduzione dei punti di collisione

pari, rispettivamente, al 55% e al 37,5%, a seconda che nel confronto con una rotatoria canonica di analoghe caratteristiche geometriche (*double lane*), vengano considerati tutti i punti di conflitto (ventidue) o quelli più frequenti (sedici). Inoltre, la delimitazione fisica delle corsie favorisce la riduzione delle velocità di percorrenza dell'anello e limita il rischio di incidenti per affiancamento laterale. Tali considerazioni permettono di avvalorare la tesi secondo cui le turborotorie si prestano ad essere utilizzate, in sostituzione delle rotatorie convenzionali di tipo "double lanes", nel caso in cui si voglia garantire un maggiore livello di sicurezza (ad esempio, laddove l'utenza ciclopedonale non risulti trascurabile [2]).

La configurazione a turbina della carreggiata anulare, la separazione fisica delle corsie e il regime delle precedenza che si stabilisce all'ingresso rendono inapplicabili, al caso delle turborotorie, i modelli di analisi di funzionalità comunemente utilizzati per le intersezioni canoniche. Ciò, tra l'altro, può anche inibirne la realizzazione, in quanto non risultano chiare, allo stato attuale, le modalità di funzionamento e, dunque, non è possibile fare un confronto con schemi già in esercizio.

Per quanto detto, è apparso indispensabile intraprendere una specifica ricerca i cui principali obiettivi sono stati quelli di: a) formalizzare un modello teorico di analisi delle prestazioni di intersezioni a rotatoria con schema a turbina, adattando, al caso in studio, alcune formulazioni esistenti applicabili alle intersezioni regolate da precedenza; b) determinare il dominio di convenienza, in termini capacitivi, delle rotatorie con configurazione a turbina rispetto a quelle convenzionali; c) valutare gli indici prestazionali (ritardi, lunghezze delle code e livelli di servizio) più aderenti al reale funzionamento delle turborotorie.

2. Condizioni operative nelle turborotorie

I modelli di analisi di funzionalità delle intersezioni a rotatoria (Setra, Bovy, Brilon, HCM, Tanner, ecc.) non si prestano ad essere impiegati al caso di turborotorie, tenuto conto delle diverse caratteristiche geometriche e delle modalità secondo cui si svolgono le manovre nei due schemi di intersezione. In particolare, per le turborotorie (cfr. Fig. 1) risulta che:

- I. i rami di ingresso presentano corsie specializzate per la svolta, fisicamente delimitate mediante cordoli;
- II. gli utenti che intendono immettersi in rotatoria devono preselezionare la corsia di marcia, lungo il ramo in ingresso, in modo da poter effettuare la manovra desiderata (attraversamento, svolta a destra e sinistra);
- III. dopo avere scelto la corsia di marcia, la traiettoria da seguire è parzialmente vincolata dalla presenza di cordoli installati sulla carreggiata anulare ed estesi sino alle uscite;
- IV. tutti i veicoli provenienti dai rami, seppur con modelli comportamentali differenti, devono dare precedenza ai veicoli circolanti;
- V. il movimento di attraversamento dell'incrocio e di svolta a sinistra entra in conflitto con il flusso circolante, distribuito su una o due corsie, che deve essere attraversato affinché i veicoli in ingresso possano immettersi sulla corsia anulare loro dedicata (corsia interna dell'anello). In tal caso, a meno di "forzare" i flussi contrastanti, le immissioni sono correlate alla probabilità congiunta di trovare "gaps"

- sufficientemente ampi (superiori all'intervallo critico) tra i veicoli delle correnti di traffico distribuiti in file parallele lungo l'anello;
- VI. le manovre di svolta a destra, diversamente da quanto accade per quelle descritte al punto precedente, avvengono in modo analogo a quanto si verifica nelle intersezioni canoniche a rotatoria.

Nel seguito si farà riferimento esclusivamente ai bracci Nord e Sud dello schema planimetrico di Figura 1.

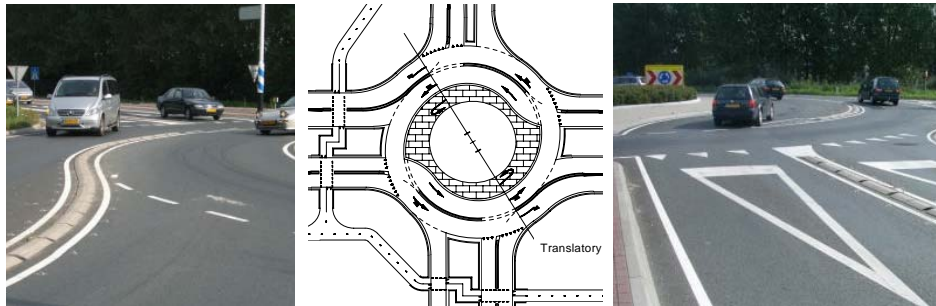


Figura1 - Immagini e schema planimetrico di turborotatorie

Capacità della corsia per la svolta a destra - Le considerazioni sinteticamente esposte spiegano le ragioni per le quali la determinazione della capacità semplice di una rotatoria a turbina richiede la valutazione preventiva delle capacità delle singole corsie di marcia degli ingressi; queste ultime, per quanto in precedenza illustrato circa le condizioni operative, sono, in generale, tra loro diseguali.

In considerazione della geometria, del tipo di regolamentazione, della traiettoria descritta dai veicoli, si assume che per la determinazione della capacità relativa alla corsia dedicata alla svolta destra ($C_{R,D}$) sia applicabile l'equazione di Tanner [3], così come modificata da Brilon e Wu [4]:

$$C_{R,D} = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_{\min} \cdot q_K}{n_K \cdot 3600}\right)^{n_K} \cdot \frac{n_Z}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_K}{3600} \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{\min}\right)} \quad (1)$$

Essendo, per i bracci Nord e Sud:

- $C_{R,D}$ la capacità della corsia di svolta a destra del ramo "R", espressa in v/h;
- q_K il traffico circolante di fronte il ramo "R", in corrispondenza della corsia di svolta a destra "D" [v/h];
- n_K il numero di corsie dell'anello;
- n_Z il numero di corsie del ramo;
- t_g l'intervallo critico [s];
- t_f il tempo di sequenza (follow – up time) [s];
- t_{\min} il minimo valore dei gaps tra i veicoli in marcia lungo l'anello (minimo distanziamento temporale) [s].

Per i coefficienti di equivalenza possono essere utilizzati i seguenti valori: 1 veicolo pesante = 1,5 automobili; 1 autoarticolato = 2 automobili; 1 bicicletta/motociclo = 0,5 automobili.

Gli intervalli temporali indicati da Brilon [5] sono: $t_g = 4,1$ s, $t_f = 2,9$ s, $t_{min} = 2,1$ s.

Introducendo nella precedente relazione i valori $n_K = 1$ e $n_Z = 1$ (il flusso in ingresso dalla corsia di svolta a destra interferisce soltanto con quello circolante su una corsia anulare), si ottiene la relazione che fornisce la capacità per la corsia in studio:

$$C_{R,D} = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_{min} \cdot q_K}{3600}\right) \cdot \frac{1}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_K}{3600} \cdot \left(tg - \frac{t_f}{2} - t_{min}\right)} \quad (2)$$

L'equazione precedente evidenzia che la capacità della corsia di svolta a destra è influenzata dal flusso circolante (q_K) e dal comportamento degli utenti, attraverso i parametri comportamentali (t_g , t_f , t_{min}), mentre risulta indipendente dalle caratteristiche geometriche dell'intersezione (larghezza corsia, raggio della rotonda, curvatura dei cigli, ecc.). La Figura 2 rappresenta la legge di variazione della capacità in funzione del flusso circolante sulla corsia esterna dell'anello ($Q_{c,e}$) corrispondente, nelle equazioni sopra riportate, a q_K . Il valore massimo della capacità, ottenuto in corrispondenza di un flusso circolante nullo, è pari a 1240 v/h; la capacità si annulla per un flusso circolante di 1715 v/h.

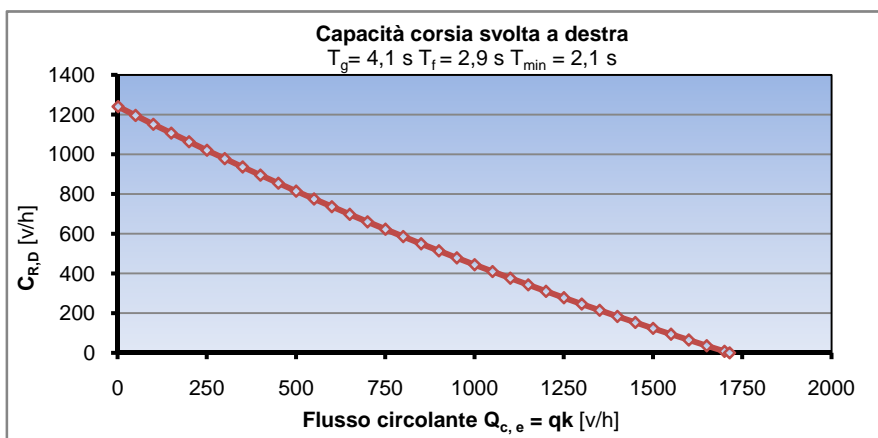


Figura 2 -Capacità della corsia dedicata alla svolta a destra

Capacità della corsia per l'attraversamento e per la svolta a sinistra - Nel caso della corsia specializzata per le manovre di svolta a sinistra e di attraversamento, tenuto conto delle condizioni operative precedentemente descritte, si ritiene che la capacità possa essere determinata approssimando l'area di manovra a quella di un'intersezione con schema a "T", regolata da precedenza ai veicoli circolanti sull'anello. In questo caso, sotto l'ipotesi che il flusso di contrasto presenti distanziamenti veicolari (τ) corrispondenti ad una legge di probabilità di tipo esponenziale negativa:

$f(\tau) = q_{c,x} \cdot e^{-q_{c,x} \cdot \tau}$, per valutare la capacità della corsia può essere utilizzata la formulazione di Harders [6]

Indicando con $C_{R,SA}$ la capacità della corsia considerata, con $q_{c,x}$ la portata di conflitto, con $T_{c,x}$ e $T_{f,x}$ rispettivamente gli intervalli critici e di sequenza, si ha che:

$$C_{R,SA} = q_{c,x} \cdot \frac{e^{-q_{c,x} \cdot \frac{T_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-q_{c,x} \cdot \frac{T_{f,x}}{3600}}} \quad (3)$$

Per il flusso di contrasto da introdurre nella (3) non sono disponibili valori validati da osservazioni di campo. Pur tuttavia, in considerazione dell'analogia della manovra in esame con quella di svolta a sinistra delle intersezioni a raso a tre bracci, si può far riferimento ai risultati ottenuti da Kyte et al. [7], così come successivamente riportati nel HCM 2000 [8]: $q_{c,x} = Q_{c,e} + Q_{c,i}$. Similmente, per quanto riguarda l'intervallo critico e quello di sequenza si può assumere, nell'ipotesi di traffico composto da sole autovetture e di sistemazione in orizzontale, $T_c = 6,4$ s; $T_f = 3,5$ s.

La legge di variazione della capacità in funzione del flusso circolante Q_c è rappresentata, in uno con la legge capacitativa della corsia di svolta a destra, nel grafico di *Figura 3*. Al riguardo si fa rilevare che per confrontare i valori di capacità fra le due corsie d'ingresso si deve tenere conto del diverso significato della variabile "flusso di contrasto".

Ad esempio, considerando un flusso circolante di 1000 v/h, equamente ripartito sulle due corsie anulari ($Q_{c,i} = Q_{c,e}$), si ricava una capacità della corsia di svolta a destra ($C_{R,D}$) pari a 815 v/h (flusso di contrasto pari a 500 v/h) ed una capacità della corsia di attraversamento e svolta a sinistra ($C_{R,SA}$) pari a 272 v/h (flusso di contrasto pari a 1000 v/h).

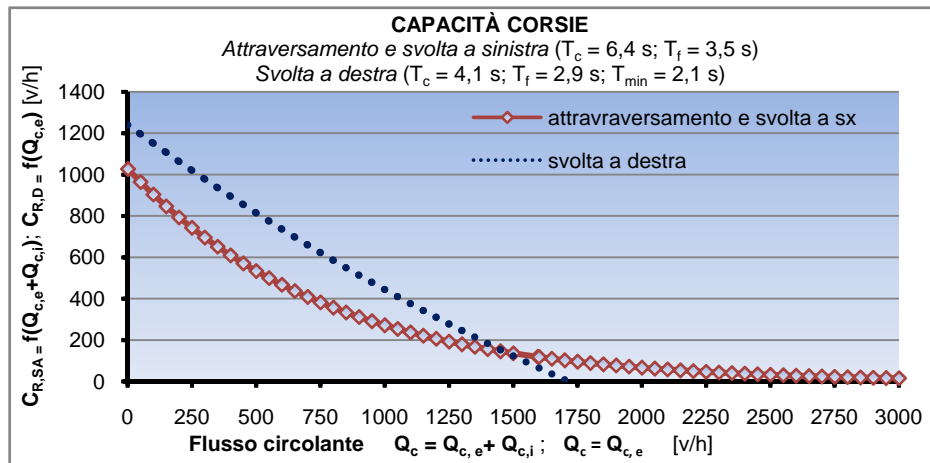


Figura 3 - Capacità della corsia dedicata all'attraversamento e alla svolta a sinistra

Capacità dell'ingresso - Considerando che a ciascuna corsia in ingresso all'intersezione competono, in genere, differenti valore di capacità (C_i), di domanda di mobilità (Q_i) e, dunque, di grado di saturazione (x_i), la capacità complessiva del ramo in ingresso non può essere calcolata sommando semplicisticamente quella delle singole corsie. Ciò in quanto è sufficiente che su una delle due corsie si raggiunga la saturazione perché sull'intero ramo d'ingresso si stabiliscano le condizioni operative proprie della capacità, caratterizzate da fenomeni di accodamento conseguenti all'eccesso di domanda. Nell'ipotesi di stazionarietà della distribuzione della domanda di traffico all'ingresso in rotatoria (espressa, ad esempio, in termini percentuali: $P_{O/D}$), la capacità effettiva dell'entrata potrà essere stimata secondo quanto descritto nel seguito.

Preliminarmente, occorre determinare i seguenti parametri:

$$x_i = \frac{Q_i}{C_i} \quad (4)$$

$$X = \max(x_i) \quad i = 1,2 \quad (5)$$

In cui x_i è il grado di saturazione della corsia i -esima (rapporto *domanda/capacità*) ed X il grado di saturazione della corsia critica, contraddistinta dal rapporto *domanda/capacità* più elevato tra le corsie esaminate.

Noto il grado di saturazione di ciascuna corsia (x_i) ed il valore X è determinabile il rapporto di utilizzazione della corsia i -esima (ρ_i), con la relazione: $\rho_i = \frac{x_i}{X}$ (6)

Appare utile evidenziare che se una corsia ha uguale grado di saturazione della corsia critica ($x_i = X$), risulta $\rho_i = 1$, mentre una corsia è sottoutilizzata nel caso in cui $\rho_i < 1$ ($x_i < X$). La capacità dell'ingresso viene ottenuta con la relazione seguente:

$$C_R = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot C_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{X} \quad (7)$$

In altri termini, la capacità C_R del ramo di un'intersezione a rotatoria con schema a turbina, corrisponde al numero massimo di veicoli in ingresso dal ramo "R" subordinatamente al raggiungimento del grado di saturazione unitario su una o più corsie appartenenti al ramo in analisi. In tali condizioni, se l'ingresso è composto da due corsie di marcia, la sua capacità è data dalla somma della capacità della corsia critica e della corrispondente portata veicolare presente sulla corsia sottoutilizzata (in stato non saturo). Nel caso di rotatoria con due corsie per ingresso si ottiene:

$$C_R = \frac{1}{\max\left[\frac{Q_{R,D}}{C_{R,D}}, \frac{Q_{R,SA}}{C_{R,SA}}\right]} \cdot \frac{Q_{R,D}}{C_{R,D}} \cdot C_{R,D} + \frac{1}{\max\left[\frac{Q_{R,D}}{C_{R,D}}, \frac{Q_{R,SA}}{C_{R,SA}}\right]} \cdot \frac{Q_{R,SA}}{C_{R,SA}} \cdot C_{R,SA}$$

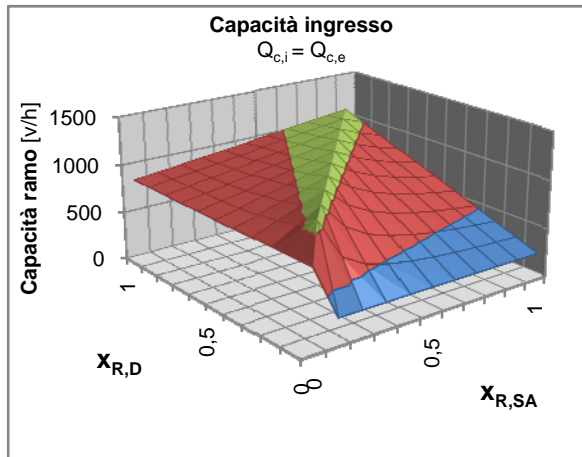
$$C_R = \frac{(Q_{R,D} + Q_{R,SA})}{\max[\frac{Q_{R,D}}{C_{R,D}}, \frac{Q_{R,SA}}{C_{R,SA}}]} \quad (8)$$

La relazione precedente dimostra che la capacità di ciascun ingresso è influenzata dalle capacità delle singole corsie, dal flusso antagonista, dalla combinazione dei flussi circolanti sulle corsie anulari, dal comportamento degli utenti (attraverso i parametri temporali T_c , T_f e T_{min}) e dal bilanciamento della domanda di traffico sul ramo. Tutto ciò permette di evidenziare che per i bracci di una turbotrotatoria non si manifesta un rapporto biunivoco tra flusso circolante e capacità dell'ingresso (come invece accade per le rotatorie convenzionali); infatti, quest'ultima varia in modo significativo al variare dell'effettivo utilizzo delle corsie del ramo.

Il valore massimo di capacità dell'ingresso viene raggiunto esclusivamente nel caso in cui tutti i rapporti di utilizzazione delle corsie risultino pari ad uno. In tale condizione

si verifica che $C_R = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot C_i = \sum_{i=1}^n C_i$; solo e soltanto in questa circostanza la capacità

dell'ingresso è data dalla somma dei valori delle capacità delle corsie che lo compongono. Nei restanti casi, in cui i gradi di saturazione $x_{R,D}$ (della corsia specializzata per la manovra di svolta a destra) e $x_{R,SA}$ (della corsia dedicata alle manovre di attraversamento dell'intersezione e svolta a sinistra) sono tra loro differenti, la capacità del ramo assume un valore inferiore alla somma delle capacità delle singole corsie. Il grafico di *Figura 4* mostra, a titolo esemplificativo, le variazioni della capacità nel ramo in funzione del grado di utilizzazione delle corsie, per assegnate condizioni al contorno.



La superficie è stata ottenuta per flussi bilanciati sulle corsie anulari: $Q_{c,i} = Q_{c,e} = 500$ v/h.

La capacità della corsia per la svolta a destra è pari a $C_{R,D} = 815$ v/h, mentre quella della corsia per l'attraversamento e la svolta a sinistra risulta $C_{R,SA} = 272$ v/h

Figura 4 – Capacità ingresso

3. Analisi funzionale delle turborotatorie

Tenuto conto di quanto sopra dedotto circa il calcolo della capacità di una turborotatoria, la procedura da seguire per l'analisi funzionale di un'intersezione di questo tipo presenta alcune specificità che qui si intendono sottolineare.

Analogamente a quanto avviene per le intersezioni canoniche, i dati di input sono: i) la matrice direzionale (O/D); ii) le caratteristiche geometriche dell'intersezione (numero delle corsie anello e rami); iii) i parametri caratterizzanti il comportamento degli utenti (T_c , T_f e T_{min}). Diversamente dalle rotatorie canoniche, nel caso di configurazioni a turbina la capacità e gli indicatori di efficienza (tempi di attesa, lunghezza delle code, livelli di servizio) devono essere riferiti alle singole corsie di ingresso.

L'insieme delle procedure da seguire è schematicamente indicato nel flussogramma di Figura 5.

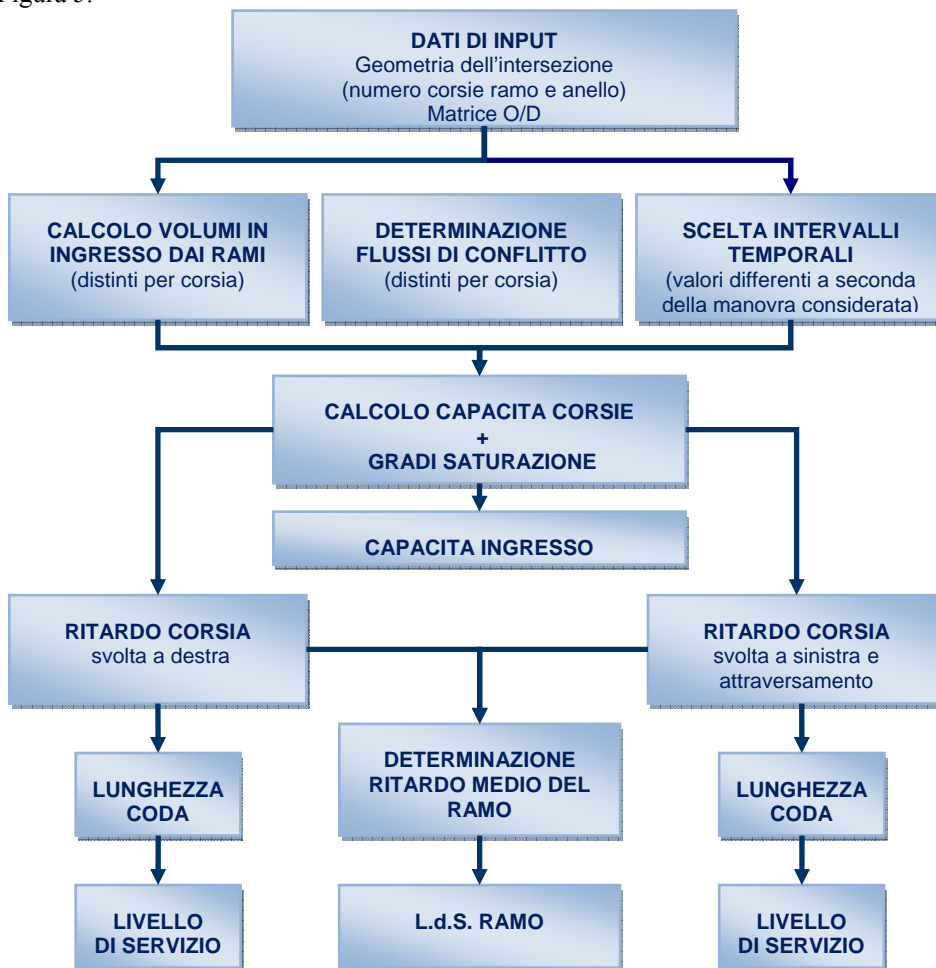


Figura 5 – procedura per l'analisi funzionale delle turborotatorie

Stima dei ritardi e dei livelli di servizio - Nota la capacità e il grado di saturazione di ciascuna corsia, nel caso in cui la domanda sia inferiore alla capacità, è possibile determinare il ritardo di controllo medio per ciascun veicolo e l'estensione della coda sulla corsia in esame, utilizzando le seguenti espressioni [8]:

$$D_i = \frac{3600}{C_i} + 900 \cdot T \cdot \left[\frac{Q_i}{C_i} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_i}{C_i} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_i}\right) \cdot \left(\frac{Q_i}{C_i}\right)}{450 \cdot T}} \right] + 5 \text{ [sec/veic]} \quad (9)$$

$$N_{95,i} = 900 \cdot T \cdot \left[\frac{Q_i}{C_i} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q_i}{C_i} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_i}\right) \cdot \left(\frac{Q_i}{C_i}\right)}{150 \cdot T}} \right] \cdot \left(\frac{C_i}{3600}\right) \text{ [sec/veic]} \quad (10)$$

Essendo, per la corsia "i":

- D_i il ritardo medio per ogni singolo veicolo in coda all'imbocco;
- $N_{95,i}$ il 95° percentile della lunghezza della coda [veic] nel periodo di picco "T";
- Q_i il flusso veicolare (veic/ora);
- C_i la capacità (veic/ora);
- T l'intervallo di riferimento (ad esempio, 0,25 per 15');
- 5 la costante di tempo per veicolo (sec/veic) che tiene conto delle accelerazioni e delle decelerazioni dovute alla presenza della coda e del diritto di precedenza per i veicoli circolanti sull'anello.

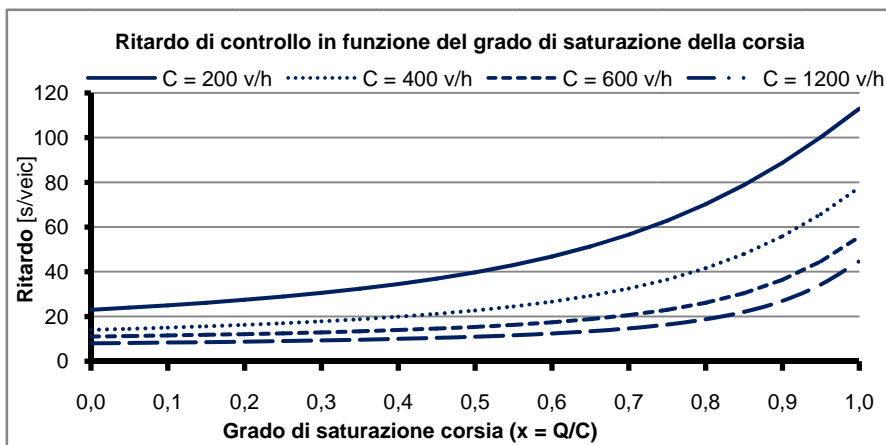


Figura 6 - Leggi di variazione del ritardo

Per definire il livello di servizio di ogni corsia degli ingressi, in mancanza di sperimentazioni, si può fare riferimento alle indicazioni valide per le intersezioni non semaforizzate, riportate dal manuale HCM 2000, che considera come parametro di riferimento il tempo medio di attesa (cfr. Tab. 1).

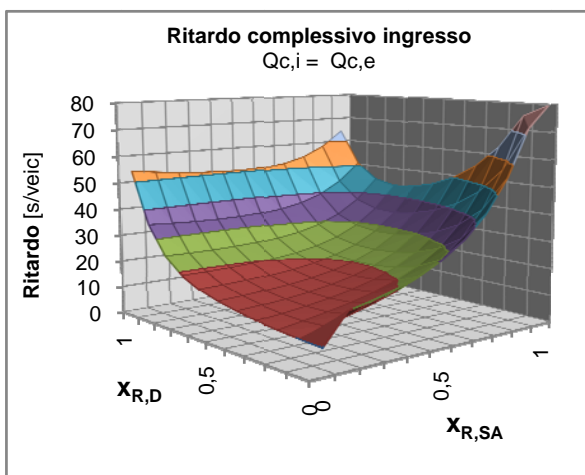
L.O.S.	RITARDO MEDIO
A	0 ÷ 10 (sec/veic)
B	10 ÷ 15 (sec/veic)
C	15 ÷ 25 (sec/veic)
D	25 ÷ 35 (sec/veic)
E	35 ÷ 50 (sec/veic)
F	> 50 (sec/veic)

Tabella 1 – Attribuzione dei livello di servizio

Nel caso generale, i ritardi veicolari risulteranno differenti per le due corsie in ingresso, dunque occorre distinguere il livello di servizio della corsia dedicata alla svolta a destra, da quello relativo alla corsia di attraversamento e svolta a sinistra.

Cionondimeno, nel caso in cui occorra un’informazione globale inerente la funzionalità di ciascun ramo dell’intersezione è sempre possibile ricorrere alla determinazione della media dei ritardi di ciascuna corsia attribuendo, a detti valori, un differente peso in relazione alla corrispondente domanda di traffico. In tal modo si può, ad esempio, operare il confronto tra le prestazioni di un’intersezione canonica e quelle di una turbo rotatoria, tenendo presente che per quest’ultima occorre, comunque, una valutazione di dettaglio per singola corsia di marcia. Indicando rispettivamente con $D_{R,D}$, $Q_{R,D}$, $D_{R,SA}$, $Q_{R,SA}$ ritardi e portate delle due corsie del braccio “R” in studio, si ottiene che il ritardo complessivo medio del ramo è dato dalla seguente equazione:

$$D_R = \frac{D_{R,D} \cdot Q_{R,D} + D_{R,SA} \cdot Q_{R,SA}}{Q_{R,D} + Q_{R,SA}} \quad (11)$$



La superficie è stata ottenuta per flussi bilanciati sulle corsie anulari: $Q_{c,i} = Q_{c,e} = 500$ v/h.

La capacità della corsia per la svolta a destra è pari a $C_{R,D} = 815$ v/h, mentre quella della corsia per l’attraversamento e la svolta a sinistra risulta $C_{R,SA} = 272$ v/h

Figura 7 – Ritardo ingresso

4. Domini di convenienza

Al fine di individuare le condizioni di traffico per le quali può risultare conveniente (in termini capacitativi) utilizzare le rotatorie con configurazione a turbina rispetto a quelle convenzionali, è stato predisposto l'abaco di *Figura 8*, valido per schemi geometrici con due corsie sia all'anello, sia sui rami di ingresso. L'abaco, si compone di una famiglia di curve (di parametro $x_{R,D}/x_{R,SA}$) ciascuna delle quali è il luogo dei punti in cui si riscontra l'eguaglianza tra le capacità semplici degli ingressi di rotatorie canoniche ed a turbina. Ciascuna curva, dunque, delimita due domini: quello a destra, in cui è maggiore la capacità delle rotatorie con schema a turbina; quello a sinistra nel quale è più grande la capacità delle rotatorie convenzionali.

E' possibile notare come il campo di convenienza delle rotatorie a turbina si riduca sempre più al crescere dello sbilanciamento tra i gradi d'utilizzazione delle corsie del ramo. L'entità di detta riduzione è differente: più marcata se prevale l'utilizzo della corsia dedicata all'attraversamento e alla svolta sinistra ($x_{R,D}/x_{R,SA} < 1$), meno marcata nel caso contrario ($x_{R,D}/x_{R,SA} > 1$).

Sotto il profilo numerico, così come può rilevarsi dalla *Figura 8*, è stato verificato che per flussi circolanti compresi tra 0 v/h e 700 v/h circa, la capacità di una rotatoria convenzionale è superiore a quella di una turborotatoria, indipendentemente dalle possibili modalità di fruizione di quest'ultima. Oltre la soglia di 700 v/h, e sino a 3000 v/h, la convenienza di una configurazione convenzionale può permanere, o venir meno, a seconda dell'intensità della domanda locale di traffico e, dunque, in relazione al bilanciamento dei flussi circolanti sulle corsie anulari e di quelli presenti sulle corsie del ramo.

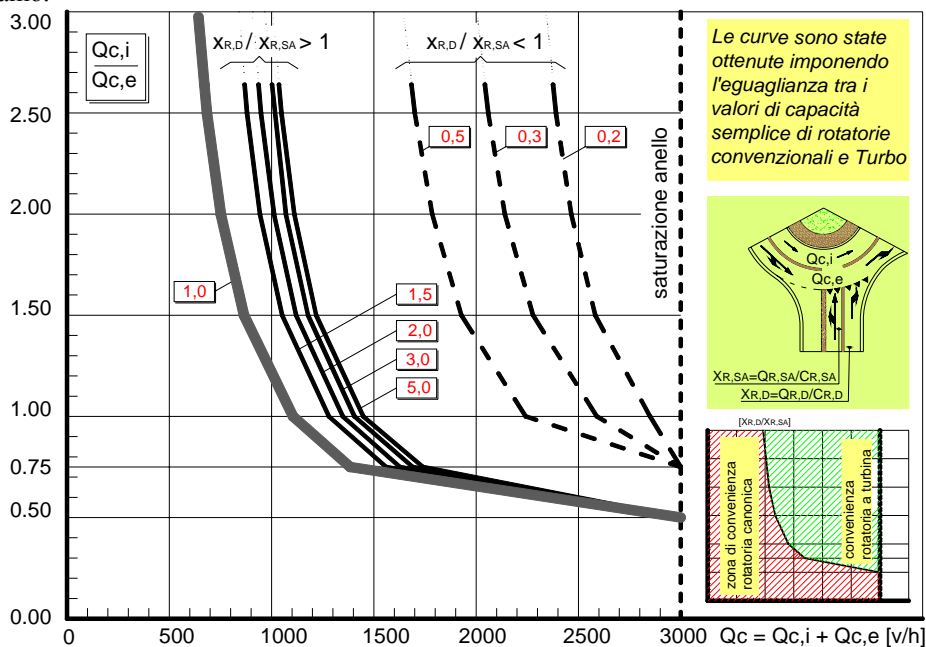


Figura 8 - Abaco per il confronto della capacità di rotatorie turbo e tradizionali

5. Conclusioni

Le intersezioni a rotatoria con schema geometrico a turbina (turborotorie) nascono con l'obiettivo di garantire condizioni di sicurezza più elevate rispetto agli schemi tradizionali. Le turbo rotatorie sono contraddistinte dalla separazione fisica delle corsie, sia agli ingressi, sia all'anello, realizzata con cordoli insormontabili; ciò produce la specializzazione delle corsie degli ingressi a cui competono esclusivamente alcune manovre di svolta. La particolare configurazione geometrica, la separazione fisica delle corsie di marcia, il regime delle precedenza che si stabilisce all'ingresso non rendono applicabili, al caso delle turborotorie, i modelli di analisi di funzionalità normalmente utilizzati per le intersezioni canoniche. Per tali motivi, nella presente memoria è stata proposta una procedura per l'analisi delle condizioni operative di intersezioni a rotatoria con schema a turbina. Dopo avere esaminato le peculiarità e le modalità d'utilizzo delle corsie di marcia dei rami e dell'anello è stata determinata la capacità della corsia specializzata per la svolta a destra e della corsia utilizzata per l'attraversamento dell'intersezione e la svolta a sinistra impiegando, rispettivamente, l'equazione di Brilon-Wu e la procedura di Harders e Kyte per gli incroci regolati da precedenza.

E' stato dimostrato che la capacità di ciascun ingresso è influenzata, oltre che dalle capacità delle singole corsie, anche dal flusso antagonista, dalla combinazione dei flussi circolanti sulle corsie anulari, dal comportamento degli utenti (attraverso i parametri temporali T_c , T_f e T_{min}) e dal bilanciamento della domanda di traffico sul ramo.

Contrariamente a quanto accade nel caso delle rotatorie convenzionali, per i bracci di una turbo rotatoria non si istaura un rapporto biunivoco tra flusso circolante e capacità dell'ingresso, ma esiste un insieme continuo di valori della capacità correlati ai gradi di utilizzazione delle corsie di marcia; il massimo valore di capacità si raggiunge nel caso in cui i rapporti di utilizzazione delle corsie risultano, simultaneamente, pari ad uno. Al fine di individuare le condizioni di traffico per le quali può risultare conveniente, in termini capacitativi, realizzare rotatorie con configurazione a turbina, piuttosto che rotatorie tradizionali, è stato predisposto uno specifico abaco, valido per schemi geometrici con due corsie sia all'anello, sia sui rami di ingresso.

Per quanto attiene i ritardi veicolari e la lunghezza delle code, le indagini devono riguardare le singole corsie di marcia, tenuto conto della loro delimitazione fisica. E' comunque possibile stimare il ritardo dell'ingresso mediando i valori dei ritardi di ciascuna corsia e attribuendo a detti valori un differente peso, in relazione alla domanda locale di traffico. In tal modo, si può operare il confronto tra le prestazioni di rotatorie a turbina e quelle di rotatorie convenzionali, sulla scorta di specifici indici prestazionali come i ritardi veicolari, che si istaurano sui rami, ed i conseguenti livelli di servizio.

6. Bibliografia

1. Andrighettoni C.; Mauro R.; (2007) – *Un nuovo Tipo di incrocio a rotatoria* – Le Strade, Ed. La Fiaccola, Gennaio – Febbraio.
2. Lambertus (Bertus); G.H. Fortuijn; (2003) – *Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety* – Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers (ITE) in Seattle (USA).

3. Tanner, J.C.; (1967) – *The capacity of an uncontrolled intersection* - Biometrika, 54 (3 and 4), pp. 657 – 658.
4. Brilon W.; Bondzio L.; Wu N.; (1997) – *Unsignalized Intersection in Germany – a State of the Art* - 2nd International Symposium for unsignalized Intersection, Portland/Oregon.
5. Brilon W.; (2005) – *Roundabouts: A State of the Art in Germany* - TRB Roundabout Conference.
6. Harders, J. (1968) – *Die Leistungsfähigkeit nicht signalregelter städtischer Verkehrsknoten [Capacity of unsignalized urban intersections]* – Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 76, Bonn: Bundesminister für Verkehr.
7. Kyte M. et al.(1996) – *Capacity and level of service at unsignalized intersection* – NCHRP Web Document 5, Vol. 1.
8. *Highway Capacity Manual* (2000), Special Report n. 209, T.R.B., Washington D.C.