

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO FUNZIONALE PER GLI SVINCOLI STRADALI

Focus sulla normativa tecnica stradale
ed esempio di dimensionamento
dei tratti di immissione in funzione
del traffico

I dispositivi di manovra nelle intersezioni a livelli sfalsati

In un mondo che va sempre più veloce ed in cui le distanze si sono accorciate rispetto al passato, spesso nell'ambito della propria attività professionale e non, ci si ritrova a percorrere molti km a bordo del proprio veicolo, in lungo e in largo per il nostro Paese. Nonostante per i medi e lunghi spostamenti l'avvento dell'Alta velocità ferroviaria ha trasformato sostanzialmente il modo di spostarsi di molti cittadini e lavoratori, negli ultimi anni si è assistito comunque ad un aumento consistente del traffico su gomma sulla rete autostradale nazionale. D'altra parte lo sviluppo di una maggiore attenzione ai temi della sicurezza stradale, sia attiva che passiva, si è tradotta nella necessità di competenze tecniche sempre più evolute anche nel settore della progettazione. A tal proposito il contributo dell'ingegnere nella corretta progettazione delle strade ricopre un ruolo fondamentale che si traduce spesso nel garantire un



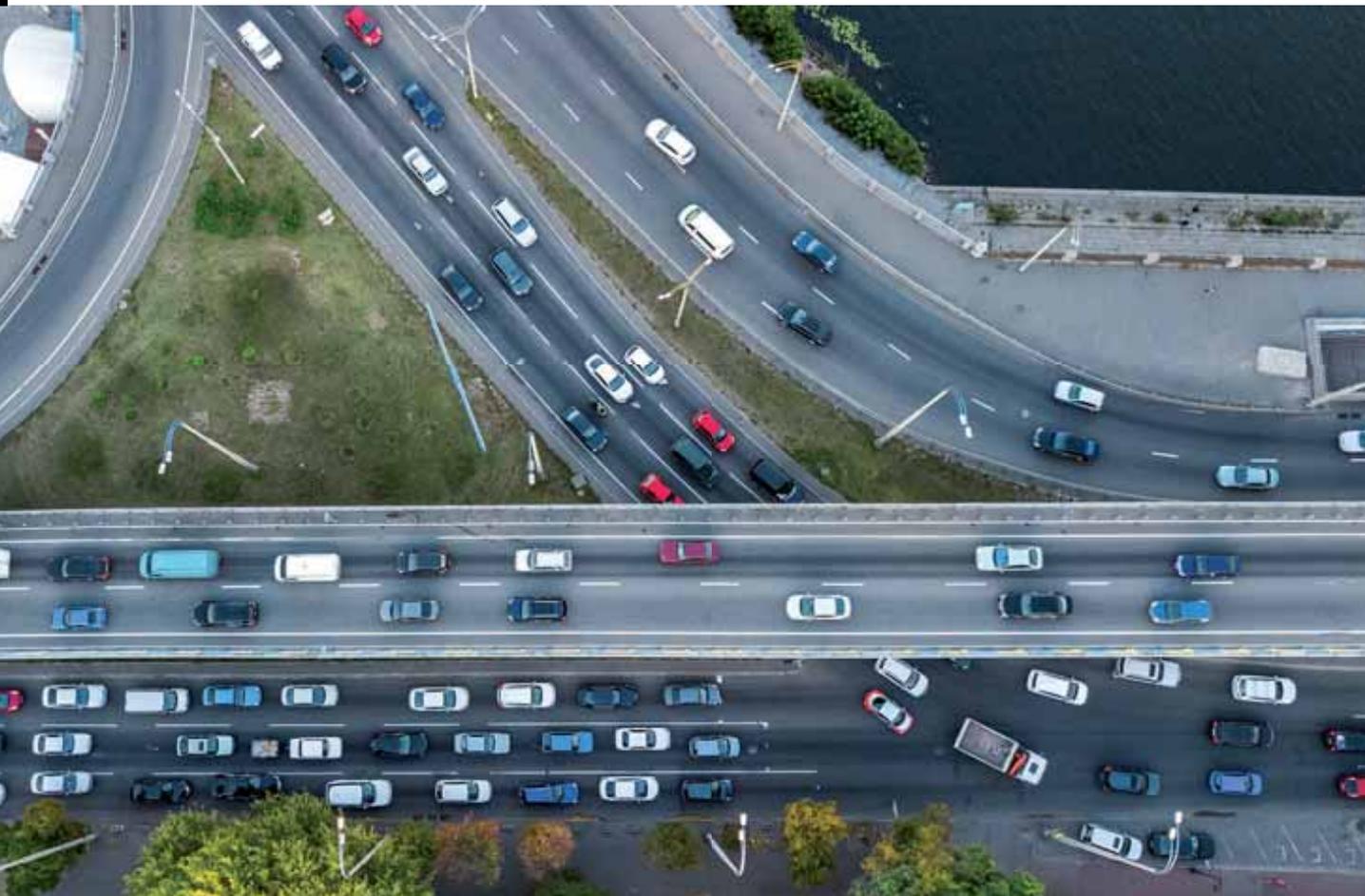
CRITERI DI DIMENSIONAMENTO FUNZIONALE PER GLI SVINCOLI STRADALI

Focus sulla normativa tecnica stradale
ed esempio di dimensionamento
dei tratti di immissione in funzione
del traffico

I dispositivi di manovra nelle intersezioni a livelli sfalsati

In un mondo che va sempre più veloce ed in cui le distanze si sono accorciate rispetto al passato, spesso nell'ambito della propria attività professionale e non, ci si ritrova a percorrere molti km a bordo del proprio veicolo, in lungo e in largo per il nostro Paese. Nonostante per i medi e lunghi spostamenti l'avvento dell'Alta velocità ferroviaria ha trasformato sostanzialmente il modo di spostarsi di molti cittadini e lavoratori, negli ultimi anni si è assistito comunque ad un aumento consistente del traffico su gomma sulla rete autostradale nazionale. D'altra parte lo sviluppo di una maggiore attenzione ai temi della sicurezza stradale, sia attiva che passiva, si è tradotta nella necessità di competenze tecniche sempre più evolute anche nel settore della progettazione. A tal proposito il contributo dell'ingegnere nella corretta progettazione delle strade ricopre un ruolo fondamentale che si traduce spesso nel garantire un





elevato standard di sicurezza per chi, a bordo del proprio veicolo è esposto continuamente a diverse criticità tra cui il pericolo di morte.

Tra i tanti contenuti ed aspetti che caratterizzano questo campo di ingegneria civile, uno tra i più interessanti è quello relativo alle intersezioni stradali, che le statistiche ci indicano i luoghi più probabili in cui avvengono gli incidenti. Il tema specifico è quello della riduzione, al limite l'eliminazione dei punti di conflitto che si generano con l'intersezione di flussi di traffico contrapposti. La risoluzione di questa problematica può determinare costosi e complessi interventi da parte degli enti gestori dell'infrastruttura, come ad esempio la sostituzione delle pericolose intersezioni a raso (siano esse semaforizzate o rotonde) con svincoli a livelli sfalsati, in particolare per le tipologie di infrastruttura che prevedono una velocità di percorrenza elevata. Gli svincoli consentono la separazione dei flussi di marcia e conseguentemente l'eliminazione di tutti i punti di

conflitto e la loro trasformazione in punti di confluenza attraverso i dispositivi per l'immissione e l'uscita dalla viabilità principale, dimensionati a mezzo di criteri geometrici e cinematici, che sono dettati sostanzialmente dal DM 19/04/2006 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali".

Tuttavia per alcuni casi non è del tutto chiaro il dimensionamento e la verifica di tali dispositivi, in particolare i tratti di immissione nell'infrastruttura principale, in funzione del traffico.

Solitamente la determinazione dei tratti di accelerazione per svincoli di nuova realizzazione viene effettuata in base alle indicazioni del paragrafo 4.2 del sopracitato DM 19/04/06, per le quali va prevista una dedicata corsia parallela in cui il veicolo, raggiunta la velocità consona ad immettersi nel flusso principale, compie la manovra, a differenza dell'uscita per la quale è possibile prevedere oltre ad una corsia parallela anche un'uscita "ad ago", ovvero una corsia con



un angolo di deviazione dal tracciato dell'asse principale.

Nel presente articolo si vuole analizzare quanto il traffico possa incidere nel dimensionamento di un'intersezione a livelli sfalsati, con l'aiuto di un caso reale in cui verranno evidenziate le criticità nella determinazione della lunghezza della corsia di immissione, secondo criteri di tipo cinematico e funzionali.

Caso reale di dimensionamento dei dispositivi di immissione

Nel calcolo degli elementi costituenti uno svincolo oltre alla modellazione plano-altimetrica dei tracciati di cui riferimento il D.M. 05/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", un tema fondamentale è rappresentato dal dimensionamento di quei tratti definibili come di "transizione" tra le rampe di svincolo e l'asse principale: in prima battuta tali dispositivi sono dimensionati in modo cinematico, valutando la differenza di velocità di ingresso dalla rampa di svincolo e la velocità a cui bisogna immettersi sull'asse principale. Ciò determina una lunghezza di corsia parallela, sia essa in

accelerazione o in decelerazione, che consente all'utente in tutta sicurezza di entrare o uscire dal flusso dell'infrastruttura principale senza disturbare il traffico di lunga percorrenza. Tale dimensionamento perfettamente normato dal D.M. 19/04/2006 è sufficiente per definire il dispositivo di uscita dall'infrastruttura mentre non lo è totalmente per quello in ingresso. In particolare, secondo quanto previsto nella suddetta normativa ed ampiamente descritto nella letteratura tecnica di settore, la corsia di immissione deve essere costituita sia da un tratto di accelerazione L1 che da un tratto cosiddetto di immissione L2 che è funzione del traffico; completa poi tale manovra la realizzazione di un tratto di raccordo (tabellato nella norma stessa). Se i tratti di accelerazione e di raccordo sono facilmente determinabili, il tratto di immissione si presta a diverse interpretazioni, da cui il ricorso a metodologie e studi semi empirici e funzionali. Inoltre va sottolineato come il traffico sia un fenomeno aleatorio e molto difficile da quantificare e prevedere; senza soffermarsi troppo sulle metodologie di analisi e simulazione che determinano i flussi di traffico e matrici di origine e destinazione dell'utenza si vuole far notare come i dispositivi di uscita ed immissione siano

fondamentali per compiere correttamente le manovre e scongiurare all'utenza una sorta di disagio o difficile lettura della geometria dell'infrastruttura stradale. Soltanto un piano di segnalamento adeguato (segnaletica orizzontale e verticale) consente all'utenza di collocarsi correttamente nella corsia dedicata e più appropriata al tragitto supposto, prevedendo le manovre in tutta sicurezza come previsto anche dal Codice della Strada.

Per una miglior comprensione del dimensionamento si è fatto riferimento ad un esempio reale che prevede un'intersezione a livelli sfalsati con una autostrada (strada di tipo A secondo il D.M. del 2001) per la quale si è considerata una velocità di progetto massima di 140 km/h.

Si riportano di seguito (tabella 1) alcuni schemi desunti dalla letteratura tecnica di settore di cui la simbologia adottata per il successivo dimensionamento.

Nella tabella 2 di seguito si riassumono i dati geometrici relativi alla configurazione di svincolo prevista per la rampa oggetto della presente secondo quanto richiesto dalle verifiche cinematiche.

Per un corretto dimensionamento delle corsie di immissione occorre fare riferimento a dati di traffico aggiornati all'entrata in esercizio della nuova infrastruttura: a titolo di esempio si riportano di seguito volumi derivanti dagli studi di traffico relativi alle rampe di ingresso e al tratto autostradale sotteso.

In particolare si è preso come riferimento la portata di progetto sulla corsia di marcia dell'asse principale (Q1) pari ad un valore TGM (traffico giornaliero medio) pari rispettivamente a 4.750 veicoli leggeri e 1.400 veicoli pesanti da cui un totale di 6.150 veic/giorno. Per quanto concerne la rampa in immissione, dai dati di traffico si desume una portata di progetto pari a circa 2.900

Tabella 1: Modello per dimensionamento corsia di immissione tipo A

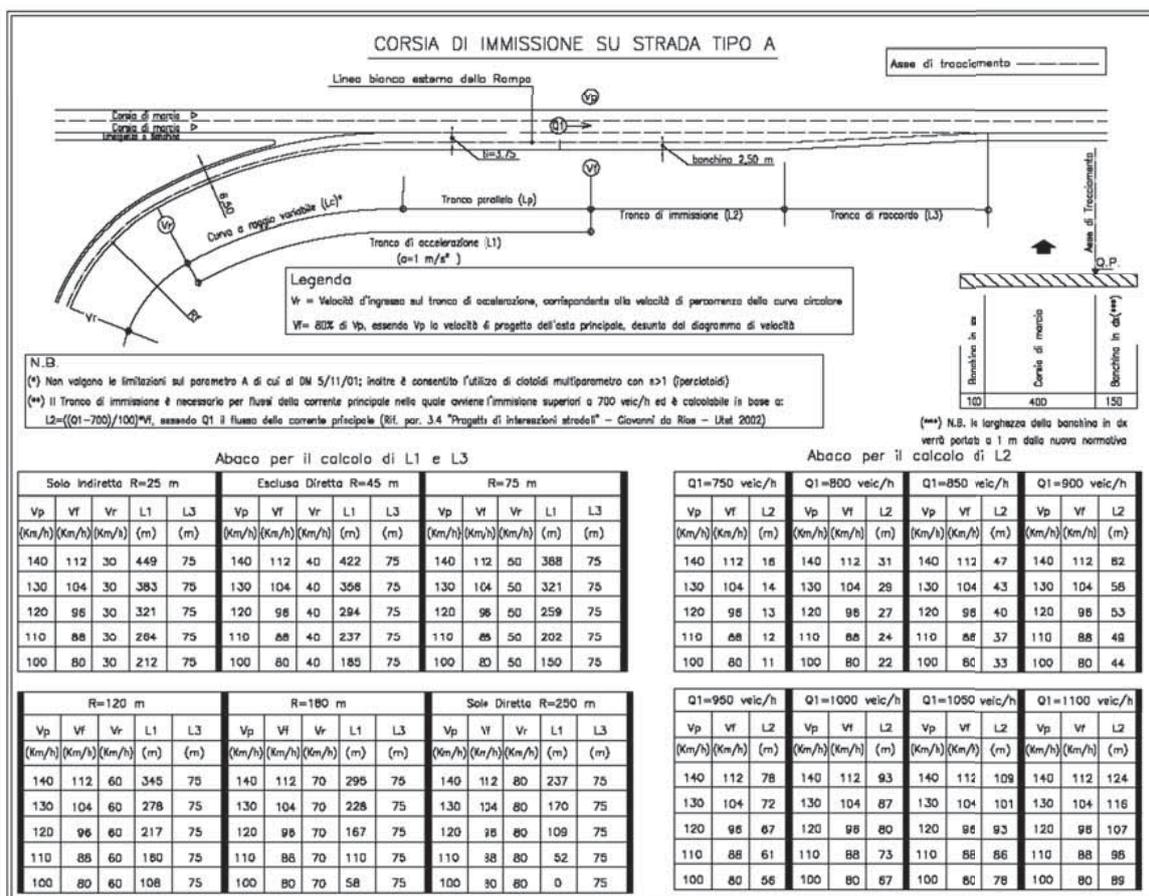


Tabella 2: Riepilogo del dimensionamento corsia di immissione

Elemento Tracciato Asse Principale	Rc	A	Vp	
Rettilineo	-	-	140 km/h	
Rampa di attacco	Sviluppo [Lc]	A	Rf	Vr
Clotoide	85.00 m	90.14	95,60 m	55 km/h
Valore della velocità a fine manovra 80% di Vp	112 km/h			
Valore della accelerazione	1 m/s ²			
Lunghezza tronco di accelerazione [L1]	367.25 m			
Lunghezza tronco parallelo [Lp]	282.25 m			
Lunghezza tronco di immissione[L2] (*)	?			
Lunghezza tronco di raccordo [L3]	75 m			

veic/giorno. Ciò tuttavia, ai fini del calcolo tali valori vanno riportati in flussi di veicoli equivalenti orari (di cui si sottolinea l'impiego di un coefficiente di equivalenza pari a 2,5): si può desumere un valore di traffico dell'ora di punta pari a 525 veic/ora per la sola direzione interessata sull'asse principale mentre per la rampa di ingresso un valore di 304 veic/ora.

Stante quanto suddetto, in riferimento ad alcune metodologie riportate nella letteratura di settore, in particolare al par. 3.4 del "Progetto delle intersezioni stradali" - Utet di Giovanni Da Rios, essendo la portata di progetto sulla corsia (Q1) di gran lunga inferiore al valore Q_{lim} di 700 veic/h, non vi sarebbe necessità di un ulteriore tronco di immissione, in quanto il solo tratto calcolato in modo cinematico risulta sufficiente e di conseguenza potrebbe essere assunto un valore di L₂=0 m.

Ciò tuttavia, secondo quanto prescritto del cap.5 "Dimensionamento funzionale delle intersezioni" del citato DM 19/04/2006 si è condotto uno studio basato su criteri probabilistici o semi-empirici (riportati in letteratura tecnica), al fine di valutare l'effettiva necessità del tratto funzionale di immissione.

Determinazione con metodo di tipo probabilistico

In alternativa a quanto soprariportato è possibile dimensionare il tronco di immissione secondo il metodo probabilistico fondato sul fatto che la corsia dovrà essere tanto più lunga quanto minore è la

probabilità che l'intervallo casuale (headway) sia maggiore dell'intervallo accettato (gap critico).

Facendo riferimento alla portata di progetto pari a 525 veicoli/ora, è stata considerata nella valutazione la velocità effettiva di percorrenza del tratto di accelerazione che si attesta a 72.30 Km/h, valore corrispondente al termine della clotoide e coincidente con il punto iniziale del tronco parallelo; tale valore è stato calcolato considerando un'accelerazione pari a 1m/s², in riferimento a quanto prescritto dal cap. 4.2 del DM 19/04/2006. Pertanto la lunghezza del tronco di immissione può essere calcolata nel modo seguente:

$$Q1 = Q / 3600 \text{ sec} = 525/3600 = 0.145 \text{ veic/sec}$$

$$\text{Headway medio } h1 = 1/Q1 = 6.85 \text{ sec}$$

Il gap critico è assunto pari a $\tau = 2 \text{ sec}$ (riferito a rampe con $V = 80 \text{ Km/h}$).

Per quanto riguarda la probabilità che si manifesti nella corsia corrente dell'asse principale l'intervallo casuale maggiore dell'intervallo accettato, in letteratura tecnica si consiglia di utilizzare un percentile del tempo di attesa elevato. Pertanto riferendosi ad un percentile di probabilità del 90%, si desume il numero degli eventi (passaggio di veicoli) che potrebbero verificarsi prima che si manifesti l'evento sotto la forma di Prob.totale > 0.90 (per $\tau = 2$).

Il tempo massimo di attesa è pari al distanziamento medio per il numero di eventi, meno il primo e risulta:

$$t \text{ max} = h1 \times (n. \text{ eventi} - 1) = 6.85 \times (2 - 1) = 6.85 \text{ sec}$$

$$L = vr \times t \text{ max}$$

Infine la lunghezza del tronco di immissione risulta pari allo spazio percorso nel tempo d'attesa moltiplicato alla velocità della rampa. Dai calcoli effettuati risulta che tale valore, considerando la successione di n.2 eventi si attesta a 138 m, corrispondente ad una probabilità pari al 93.60%. Se tuttavia si tenesse conto di un solo evento, ovvero si accettasse una probabilità pari al 74.70%, il valore del tronco di immissione sarebbe di soli 40 m. Pertanto da una semplice interpolazione di tali valori in maniera lineare (sovrastimando così il risultato a favore di sicurezza), alla percentuale del 90% richiesta dalla norma la lunghezza del tratto funzionale si attesta a circa 120 m.

Pertanto dalle risultanze di quanto soprariportato e dettagliato nelle tabelle di seguito, la lunghezza del tratto parallelo di 282 m risultante dalle verifiche cinematiche della normativa per la rampa in esame risulta sufficiente a soddisfare tale verifica.

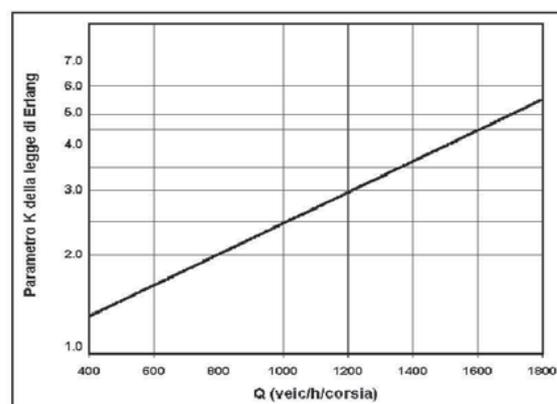
Metodo di Erlang stima analitica

Una seconda verifica con una metodologia di tipo probabilistico è stata effettuata con la stima di Erlang: a favore di sicurezza nel calcolo si è assunto il flusso orario dei veicoli equivalenti sulla corsia di marcia pari a 525 veic/h. Si è poi considerata la velocità effettiva del punto di fine clotoide ed inizio del tronco parallelo pari a 75.3 Km/h, assumendo la distanza temporale di sicurezza fra due veicoli della corrente principale pari ad 1 secondo e soprattutto l'accelerazione con cui avviene l'immissione pari ad $a = 1.2 \text{ m/s}^2$, da cui si è desunto l'intervallo critico T risulta 6.249 sec. Tale valore così calcolato va inserito nelle espressioni che danno la media e la varianza del tempo di servizio, al fine di calcolare il tempo medio di attesa $E(w)$.

La lunghezza del tratto di immissione è ottenibile solo nell'ipotesi di un singolo veicolo isolato, trascurando quanto deducibile in letteratura riguardo l'influenza dei veicoli in coda. Come deducibile anche dal grafico riportato in fig.1 va sottolineato che per valori di traffico così bassi, il parametro K definito "costante di Erlang" risulta sicuramente minore di 2.

Pertanto accettando un valore percentile dell'80%, inteso come la probabilità che si manifesti nella corsia corrente dell'asse principale l'intervallo casuale maggiore dell'intervallo accettato (raccomandato sempre maggiore del 70%),

Figura 1: Determinazione costante di Erlang



E(W) Media dei tempi di attesa in coda
 E(S) media del Tempo di Servizio
 V(S) Varianza del Tempo di Servizio
 T Intervallo critico

applicando la formula relativa al calcolo di $E(w)$ si ottiene che il valore del tratto parallelo $L_{imm} = 310 \text{ m}$, valore maggiore di quanto previsto dalle verifiche cinematiche che si attesta a 282 m. Ciò si traduce in un deficit di circa 28 m rispetto a quanto previsto nella rampa in esame, che andrebbe realizzato come tratto "L2" funzionale.

Metodo di Erlang stima grafica

Infine è stata condotta un'ulteriore verifica sulla lunghezza della corsia di immissione dello svincolo in oggetto, facendo riferimento alla letteratura tecnica di settore, in particolare al testo Ferrari P. – Giannini F. "Geometria e progetto di strade" (1991) di cui la metodologia semi-empirica richiamata nel cap.5 del DM 19/04/2006, desunta dalla legge di probabilità di Erlang.

Innanzitutto si vuole evidenziare che tale metodologia di calcolo, per bassi valori di flusso di traffico veicolare, non risulta molto affidabile in quanto esistono in letteratura, come riportato in fig.2, alcuni abachi che permettono di determinare soltanto "graficamente" la lunghezza del tronco di immissione " L_m " in funzione della velocità con cui viene percorsa la rampa e della portata Q_1 entrante, ma con valori standard ben definiti relativi ai flussi di traffico sull'asse principale.

Nel dettaglio i valori contemplati dagli abachi prevedono per l'asta principale un flusso di traffico passante rispettivamente di 400, 800 o 1200 veicoli/ora: ciò significa che in alcuni casi si è

costretti ad utilizzare un valore di portata dell'asse principale maggiore o comunque ben distante dalle risultanze degli approfonditi studi di traffico. Inoltre negli stessi abachi le curve di portata relative al flusso entrante delle rampe sono imposti anch'essi a valori standard che vanno da un minimo di 200 ad un massimo di 1000 veicoli/ora, con intervallo di 200 e ciò spesso costringe ad una approssimazione della curva stessa o del valore ottenuto. Stante quanto suddetto la stima andrebbe effettuata sempre nella condizione più gravosa (a favore di sicurezza) accettando così un margine di incertezza sul risultato finale. Nel caso in esame si è fatto riferimento all'abaco con il valore minimo di portata sull'asse principale pari a 400 veic/h nonostante sia minore di quanto previsto, mentre per la rampa il valore desunto dallo studio di traffico Q_1 pari a 340 veic/h va interpolato dalle curve presenti. Come per i metodi precedenti si è calcolata una $V_1 = 73$ Km/h in riferimento all'effettiva velocità di percorrenza nel punto di fine clotoide (stimata cinematicamente con accelerazione 1 m/s^2). Stante quanto suddetto, con l'ausilio del grafico riportato nella figura 2 tratta

dal testo Ferrari P. – Giannini F. "Geometria e progetto di strade" (Utet 1991) si può desumere verosimilmente un valore $L_m/2$ di circa 140 m, da cui una lunghezza del tronco di immissione pari a 280 m, comparabile con quanto previsto nelle verifiche cinematiche. Pertanto, nonostante le diverse incertezze ed assunzioni effettuate sempre a favore di sicurezza, secondo le risultanze di tale metodologia la lunghezza richiesta dalle verifiche cinematiche (283 m) sembra non richiedere un ulteriore allungamento della corsia per le verifiche funzionali. Dagli abachi si può desumere che, a parità di traffico sull'asta principale, incrementando il volume di traffico sulla rampa di svincolo la lunghezza del dispositivo per l'immissione raggiunge rapidamente valori più alti e ciò sottolinea quanto sia interessante una sorta di verifica della "capacità" degli svincoli esistenti per i quali certamente negli anni il traffico è incrementato.

Conclusioni

Le risultanze ottenute dalle diverse metodologie di calcolo semi-empirico e probabilistico illustrate, sebbene siano relative a dispositivi con analoghi requisiti funzionali e trasportistici restituiscono una sostanziale incertezza nel dimensionamento dei dispositivi stessi. Difatti i calcoli effettuati con tali metodi danno risultati con differenze non trascurabili, palesando un margine di errore nelle condizioni al contorno e nelle assunzioni che per il campo dell'ingegneria civile non si ritengono accettabili. Sarebbe auspicabile in un aggiornamento normativo più ampio, analizzare nello specifico tale criticità oppure perseguire una soluzione più univoca, magari frutto anche di un'analisi empirica delle casistiche effettive, come peraltro presente nel campo legislativo europeo. Dal punto di vista della funzionalità va sottolineato come una lunghezza modesta delle corsie di manovra porta certamente un deficit della sicurezza stradale mentre un valore sovradimensionato può arrecare incertezza e disagio nell'utenza, che alla vista di una corsia libera nella propria destra potrebbe compiere azzardate manovre di sorpasso o traiettorie non coerenti con il normale flusso di traffico.

Figura 2: Abaco calcolo tratto dal testo "Ferrari-Giannini Geometria e progetto di strade"

