

Una metodologia di analisi basata sull'elaborazione delle immagini in grado di estrarre dai rilievi effettuati con videocamera la matrice E/U, la composizione del traffico, le traiettorie dei singoli veicoli e i diagrammi di velocità

L'ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI UNA ROTATORIA CON TECNICHE DI ANALISI DELLE IMMAGINI

Lorenzo Mussone*
Marco Bassani**
Matteo Matteucci***
Davide Rizzi****

La memoria sviluppa una metodologia di analisi delle prestazioni di intersezioni a rotatoria basata sull'analisi delle immagini. In un precedente articolo degli stessi Autori pubblicato in questa Rivista [1] furono esposte le motivazioni e le problematiche legate al rilievo delle immagini.

Le attività di ricerca sviluppate nel frattempo hanno permesso di mettere a punto una tecnica di analisi e uno specifico software, denominato VeTRA (Vehicle Tracking Analysis) con il quale eseguire il trattamento dei fotogrammi e la derivazione di quelle grandezze che caratterizzano il movimento dei veicoli nell'intersezione.

I risultati di un caso studio, costituito da una rotatoria compatta urbana a quattro bracci, sono qui di seguito presentati. Grazie a specifici algoritmi di calcolo per la correzione degli effetti ambientali derivanti dall'azione del vento che provocano l'oscillazione della videocamera e dalla formazione di ombre temporanee che modificano lo sfondo dell'immagine e dovute al movimento delle nuvole, il software è anche in grado di compensare autonomamente le perdite di informazioni che derivano dalla occlusione parziale o totale che può determinarsi tra i veicoli in movimento all'interno dell'anello circolatorio.

Come risultato delle elaborazioni, VeTRA restituisce la matrice Entrati-Usciti (E/U), la classificazione dei veicoli in motocicli, autovetture e mezzi pesanti, le tracce planimetriche delle singole traiettorie dei veicoli e, infine, i diagrammi di curvatura e velocità operativa.



Nel moderno approccio ingegneristico alla realizzazione e alla gestione delle infrastrutture viarie, il rilievo ex-post di tipo geometrico-funzionale si propone di fornire il quadro cognitivo delle condizioni operative dell'infrastruttura. Tale rilievo può essere di supporto a una serie di attività che non si limitano al solo collaudo tecnico, ma abbracciano e si estendono a tutto il processo di concezione, progettazione, costruzione, esercizio e manutenzione delle strade.

E' infatti attraverso il rilievo geometrico-funzionale che è possibile verificare gli obiettivi del progetto, definire gli eventuali interventi di manutenzione straordinaria finalizzati al miglioramento prestazionale dell'infrastruttura, validare i modelli e i metodi utilizzati in fase di progettazione o, infine, calibrare nuovi modelli fisico-matematici tra le variabili in gioco. Questa nuova impostazione consente di considerare anche l'aleatorietà intrinseca dei fenomeni che si osservano nelle correnti veicolari in cui avvengono processi di scelta relativi, ad esempio, alla velocità, alla traiettoria, alla scelta della corsia da occupare e all'esecuzione di specifiche manovre quali, ad esempio, il sorpasso. Oltre alle sintesi opportune per una prima lettura delle prestazioni, sono anche necessarie analisi più dettagliate per singolo veicolo che riguardano le sue interazioni con l'infrastruttura e con gli altri veicoli circostanti.

Se nella realizzazione di nuovi tronchi e intersezioni della rete stradale le Norme prevedono solo l'obbligatorietà delle verifiche ex-ante al progetto [2], le stesse Norme aprono di fatto nuovi scenari ai controlli di tipo ex-post sulle relazioni che intercorrono tra le caratteristiche geometriche e le prestazioni funzionali in termini di qualità della circolazione e sicurezza dell'utenza. Ciò si deve al fatto che le Norme italiane, le sole Norme cogenti nel panorama internazionale, se da un lato fissano in modo inequivocabile il quadro delle responsabilità attribuite alle figure professionali coinvolte nel processo di realizzazione, dall'altro stabiliscono anche i livelli di prestazione operativa che il gestore dell'infrastruttura deve garantire nei riguardi dell'utenza [3].

Le attività di ricerca illustrate nella memoria si collocano in questo scenario tecnico normativo. Seppur ancora limitata dagli autori alle sole intersezioni a rotatoria, la tecnica di rilievo e analisi proposta nella presente memoria è applicabile anche ad altri ambiti operativi, siano essi tronchi o intersezioni. In generale, essa può intendersi applicabile laddove vi sia un interesse specifico nella ricerca delle relazioni che intercorrono tra l'assetto geometrico dell'infrastruttura e le variabili operative quali le portate veicolari, la composizione del traffico, le velocità e le traiettorie prevalenti, l'incidentalità.

L'articolazione delle analisi prevede una fase di rilievo delle immagini e una successiva fase di elaborazione, a più passi, per la loro trasformazione e la successiva estrazione delle informazioni.

Nel caso studio di seguito illustrato, il rilievo è stato eseguito con una videocamera digitale ad alta definizione per le riprese dell'anello circolatorio e una strumentazione per il rilievo GPS della traiettoria di un veicolo strumentato, mentre la successiva elaborazione è sviluppata mediante l'impiego del codice di calcolo denominato "VeTRA" attraverso cui è possibile eseguire:

- ◆ la ricostruzione delle singole traiettorie;
- ◆ l'identificazione delle sagome delle entità in movimento;
- ◆ la derivazione delle grandezze cinematiche (velocità e accelerazioni) relative a ciascuna delle traiettorie rilevate.

Le elaborazioni delle immagini

Come anticipato in precedenza e in [1], la strumentazione cui si è fatto riferimento per il rilievo delle immagini è costituita da una telecamera e da un PC portatile con cui è stata eseguita l'acquisizione. I dati sono estratti in un secondo tempo in laboratorio e le immagini sono elaborate attraverso VeTRA che opera seguendo le cinque fasi qui indicate:

1. stabilizzazione delle immagini;
2. ricostruzione di un modello dello sfondo (background) da cui estrarre le macchine per differenza rispetto al fotogramma;
3. rilevazione delle zone di immagine in cui ci sono oggetti in movimento, compensazione delle ombre, filtraggio dei disturbi dovuti a rumore sull'immagine;
4. associazione di queste aree ai veicoli precedentemente tracciati o generazione di nuovi veicoli qualora queste aree si riferiscano a nuovi veicoli che affrontano l'intersezione;
5. aggiornamento della traiettoria dei veicoli sul piano immagine con le nuove misure acquisite.

Queste operazioni considerano la variabilità delle condizioni di illuminazione che possono verificarsi durante i periodi di acquisizione e per tale motivo il meccanismo di sottrazione dello sfondo qui adottato è di tipo adattativo.

In particolare, il modello dello sfondo prescelto si adatta ai cambiamenti di illuminazione e agli spostamenti accidentali del sistema di

acquisizione. Nel caso analizzato, è stato sufficiente curare alcuni dettagli del sistema di acquisizione ottenendo così una traiettoria di qualità soddisfacente. Inoltre, l'acquisizione dell'immagine è avvenuta con singola telecamera che è stata collocata vicino alla verticale passante per il centro della rotatoria in modo da limitare gli effetti della distorsione prospettica.

Il caso studio

La rotatoria del caso studio (Figura 2) è ubicata a Biella quasi al limite della delimitazione urbana della città. Essa si colloca su due assi di collegamento importanti: il primo costituito dalla Via per Candelo, la strada di collegamento tra il Capoluogo e la città di Candelo, il secondo è Corso San Maurizio, rappresentante l'asse di gronda Sud della città che da Ovest convoglia i flussi verso i collegamenti a Est quali quelli per Cossato, Vallemosso e l'Autostrada A26. Quest'ultima strada ha due corsie per senso di marcia con carreggiate separate da spartitraffico centrale (guard-rail metallico) ed è interessata anche da una quantità elevata di veicoli pesanti. Gli attraversamenti pedonali sono presenti su tre dei quattro bracci, tutti con due corsie in attestamento.

Il diametro di 50 m classifica l'intersezione come rotatoria convenzionale con un anello circolatorio di 13 m e un'isola centrale di 24 m comprensivi di cordolo sormontabile da 1,5 m. La rotatoria è dotata di illuminazione centrale con torre faro, mentre i sistemi di raccolta delle acque di piattaforma si collocano all'esterno dell'anello circolatorio. Nel corso delle indagini il sistema di rilevamento è stato collocato su un cestello mobile posto in prossimità del ciglio sull'angolo di Sud-Est (Figura 3A) con la videocamera posta a una altezza di circa 22 m. In Figura 3B è riportata l'immagine della rotatoria ripresa dalla telecamera e in Figura 3C come essa viene trasformata dal software.

L'analisi dei dati

L'obiettivo delle analisi riportate in questa memoria riguarda in modo specifico le elaborazioni dei dati del caso studio. Particolare enfasi viene data ai risultati relativi alla ricostruzione della matrice E/U per ogni categoria veicolare e quelli conseguenti alla ricostruzione delle traiettorie.

La classificazione dei veicoli avviene tramite un modello specifico realizzato con una rete neurale che riconosce la classe dei veicoli sulla base dell'immagine elaborata in VeTRA. Al momento sono previste tre categorie: velocipedi e motocicli, auto e mezzi pesanti, ma è comunque possibile perseguire un maggiore dettaglio.

La ricostruzione delle traiettorie veicolari rappresenta il risultato di una elaborazione più complessa, eseguita con l'algoritmo di "tracking", ricco di informazioni operative che riguardano, per esempio, il percorso

scelto in funzione dei flussi, il rapporto che intercorre tra la tortuosità delle traiettorie e le velocità operative su di esse rilevate e, ovviamente, la geometria.



Figura 2 - Il layout schematico della rotatoria del caso studio con numerazione dei bracci



Figure 3A, 3B e 3C - La postazione di rilevamento (3A) con la relativa vista (3B) e l'immagine elaborata della rotondina (3C)

Le prestazioni del tracker

L'errore di localizzazione del veicolo è stato valutato confrontando i dati raccolti dal sistema RTK-GPS con quelli elaborati dal "tracker" di VeTRA. La distanza percorsa nella fase di campionamento dal veicolo strumentato su cui è stato installato il sistema RTK-GPS è di 2,8 km con una velocità media intorno ai 35 km/h (sufficiente da poter scartare l'effetto dell'errore dovuto al rumore presente sulle singole immagini).

In Figura 4 sono riportati i tracciati delle traiettorie ricavati con i due metodi (in rosso i dati del GPS e in blu quelli del tracker). Come si può notare, l'errore non è uniforme nello spazio essendo più elevato sui bracci di entrata/uscita a causa dei problemi di distorsione prospettica.

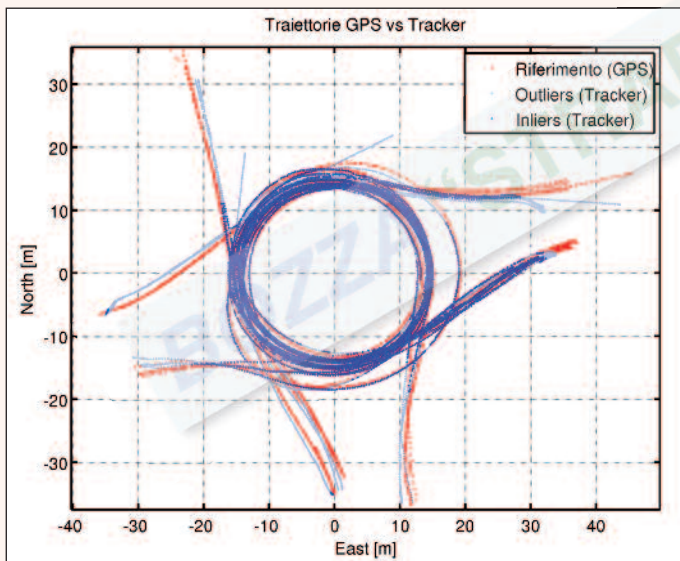


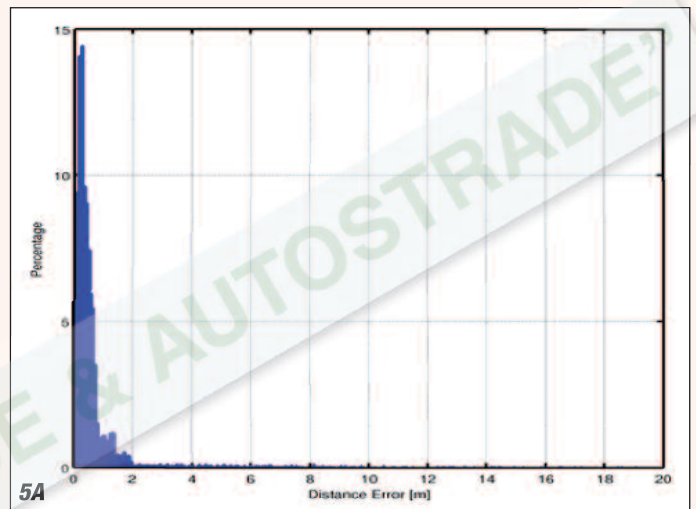
Figure 4 - Il risultato dell'allineamento tramite RANSAC

In Figura 5A è riportata la distribuzione dell'errore (in percentuale sul totale).

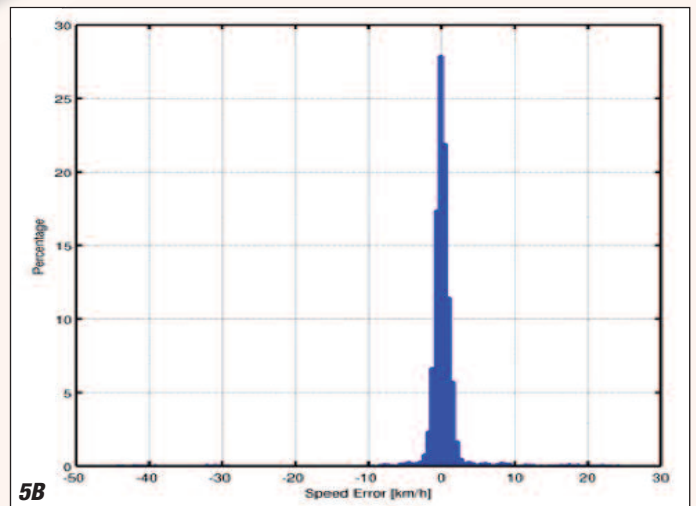
La statistica dei valori (calcolati limitatamente all'anello circolatorio) è la seguente:

- ♦ il valore medio dell'errore è di 0,375 m;
- ♦ il valore mediano dell'errore assoluto (MAD) è di 0,179;
- ♦ l'intervallo interquartile (IQR) è di 0,399 m.

Riguardo l'errore sulla misura di velocità si è proceduto allo stesso modo usando i dati di velocità rilevati con il sistema RTK-GPS. In Figura 5B è riportata la distribuzione dell'errore della velocità (in percentuale sul totale); il valore medio è di 0,11 km/h con una deviazione standard di 2,7 km/h.



5A



5B

Figure 5A e 5B - La distribuzione dell'errore assoluto di localizzazione (5A) e distribuzione dell'errore di velocità (5B)

L'analisi della matrice E/U

La conoscenza della matrice E/U è fondamentale per la verifica delle prestazioni operative di una rotondina. Infatti, contrariamente a quanto accade nel caso di un'intersezione semaforizzata, in rotondina non vi è alcuna differenza di trattamento dei dati relativi ai movimenti a maggiore impedenza (quale è ad esempio la "svolta a sinistra") che possono condizionare negativamente il livello di servizio, e gli altri movimenti. Inoltre, il livello di servizio può essere differenziato per singolo braccio in relazione alla struttura della matrice E/U.



	Operatore 1	Operatore 2	Operatore 3	Tracking Corr	Media Op	$\Delta(\mu OP, T_{corr})$
E/U 1,1	2	2	2	3,05	2,00	1,05
E/U 1,2	14	17	13	17,38	14,67	2,72
E/U 1,3	102	116	96	104,70	104,67	0,04
E/U 1,4	3	2	2	2,29	2,33	-0,04
E/U 2,1	15	19	15	12,81	16,33	-3,52
E/U 2,2	1	1	1	1,32	1,00	0,32
E/U 2,3	20	29	21	24,72	23,33	1,39
E/U 2,4	38	47	33	35,36	39,33	-3,97
E/U 3,1	94	113	90	108,80	99,00	9,80
E/U 3,2	21	32	18	13,39	23,67	-10,28
E/U 3,3	1	0	3	0,00	1,33	-1,33
E/U 3,4	34	44	29	44,70	35,67	9,03
E/U 4,1	9	13	9	13,95	10,33	3,62
E/U 4,2	58	69	52	68,32	59,67	8,65
E/U 4,3	69	67	61	63,03	65,67	-2,63
E/U 4,4	2	2	1	1,17	1,67	-0,50
Totale	483	573	446	515,00	500,67	14,33

La stima manuale dei flussi e confronto con la misura automatica del tracker per 15 minuti di filmato

La ricostruzione della matrice E/U avviene a valle del processo di classificazione dei veicoli e della ricostruzione delle traiettorie. Le linee di entrata e uscita dalla rotatoria vengono definite con apposita procedura sull'immagine del background; la traiettoria che incrocia una linea di entrata e una di uscita determina l'incremento di uno specifico contatore collegato al movimento corrispondente a quella entrata e a quella uscita. Le traiettorie incomplete, per esempio per la perdita di frame, per occlusione o altri motivi legati alla qualità delle immagini rilevate, vengono successivamente rielaborate prima graficamente e poi statisticamente e, infine, assegnate a un movimento.

In Tabella si riportano i conteggi di traffico relativi a un quarto d'ora elaborati manualmente da tre distinti operatori sulla sequenza filmata (intesi come stimatori del valore medio) e i conteggi automatici eseguiti dall'algoritmo di tracking presente in VeTRA sulla medesima sequenza dopo un processo di validazione e ricostruzione delle traiettorie.

Il confronto tra la media dei valori ottenuti dagli operatori (quarta colonna) e l'algoritmo di tracking è riportato nell'ultima colonna. La differenza tra i dati rilevati dagli operatori e i risultati derivati dall'applicazione dell'algoritmo risulta inferiore al 3%. Dalla stessa Tabella si evince inoltre come le maggiori differenze tra dati rilevati in modo manuale e quelli misurati in modo automatico siano ascrivibili ai movimenti riguardanti il braccio 3 che, non a caso, è quello maggiormente affetto da problemi di occlusione e distorsione prospettica.

Le analisi delle traiettorie

Nella progettazione geometrica delle intersezioni a rotatoria la letteratura tecnico-scientifica suggerisce di porre particolare cura alla curvatura della traiettoria assunta dai veicoli in fase di avvicinamento, attraversamento e abbandono dell'anello circolatorio.

In particolare, viene costantemente suggerito di verificare la presenza di un'accentuata inflessione delle traiettorie di attraversamento. Tutto ciò non si verifica nei seguenti casi:

- ◆ quando sono adottate combinazioni inappropriate del diametro dell'isola centrale e della geometria dei rami di ingresso nell'anello;
- ◆ quando l'asse di tracciamento di ciascun braccio non è allineato al centro della rotatoria;
- ◆ quando lo stesso asse si colloca alla sua destra [4].

Tali indicazioni sono suffragate dall'esperienza maturata osservando rotatorie caratterizzate proprio da questi difetti geometrici. Nonostante vi siano più indicazioni in tal senso, ad oggi non sono disponibili relazioni quantitative che evidenzino il rapporto tra l'andamento della traiettoria e la velocità operativa osservata lungo la stessa. Questa lacuna causa profondi dubbi nei Progettisti chiamati a intervenire in contesti con limitati margini di scelta dell'assetto geometrico e che inducono l'adozione di geometrie d'asse e di ciglio non conformi ai canoni o alle prescrizioni delle Norme tecniche vigenti.

Nell'ottica di fornire un supporto quantitativo ai Professionisti superando le evidenti difficoltà di cui sopra, il rilievo eseguito sul caso studio ha permesso di elaborare le traiettorie dei soli veicoli isolati su cui sono state esaminate le tortuosità e i profili di velocità. A tal fine, i dati estratti dalle immagini video sono stati elaborati come di seguito descritto:

- ◆ sono state considerate le sole traiettorie di veicoli leggeri che presentavano velocità in ingresso superiori a 10 km/h, in modo da escludere le traiettorie di veicoli condizionati all'ingresso (in Figura 6 sono rappresentate le traiettorie dei 16 possibili movimenti in sequenza ordinata per movimento come nella matrice E/U);

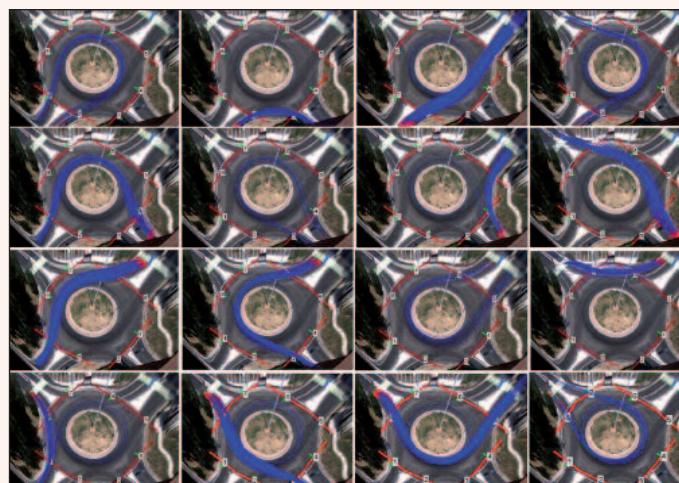


Figura 6 - I fasci di traiettorie (in blu) dei soli veicoli leggeri con velocità minima all'ingresso (V_e) superiore a 10 km/h per ogni possibile movimento

- ♦ ogni traiettoria è stata depurata della parte esterna all'anello circolatorio poiché, per i dati disponibili, meno affidabile da un punto di vista geometrico;
- ♦ è stata quindi calcolata la tortuosità (t) attraverso la seguente equazione:

$$t = \frac{\sum_i \frac{\alpha_i}{R_i}}{L}$$

dove:

- ♦ l'angolo α_i = la deviazione angolare misurata in radianti tra due punti successivi (il punto i -esimo e il punto $i+1$ -esimo);
- ♦ R_i = il raggio in metri del cerchio osculatore calcolato nell' i -esimo punto;
- ♦ L = lo sviluppo (sempre in metri) dell'intera traiettoria tra le due sezioni di estremità.

Per quanto riguarda le velocità, sono stati considerati tre valori: il primo valore V_1 rappresenta la velocità nella sezione d'ingresso della corona circolatoria, il secondo V_2 è la velocità nel punto medio della traiettoria (in corrispondenza del centro della rotatoria), il terzo valore V_3 indica la velocità nella sezione di uscita della corona circolatoria. I valori di dette velocità sono rappresentati nei 16 grafici di Figura 7 (in sequenza ordinata per movimento come nella matrice E/U), i quali riportano l'indicazione del punto di ingresso e di uscita mediante i punti rossi riportati per ogni traiettoria rilevata, mentre le velocità V_2 sono riportate in corrispondenza della progressiva 0 m che rappresenta il punto centrale della traiettoria all'interno dell'anello centrale (il numero sopra ogni diagramma indica il numero di traiettorie considerato).

Dall'esame di Figura 7 si osserva che in alcuni casi i punti rossi di intersezione tra traiettoria e sezioni di ingresso e uscita appaiono più dispersi rispetto ad altri in cui gli stessi appaiono più allineati: succede quando per alcune manovre sono possibili traiettorie più lunghe o più corte.

Le traiettorie considerate sono state assegnate alle 16 manovre complessive che derivano dal prodotto tra i quattro rami e le quattro manovre (svolta a destra, attraversamento, svolta a sinistra e inversione).

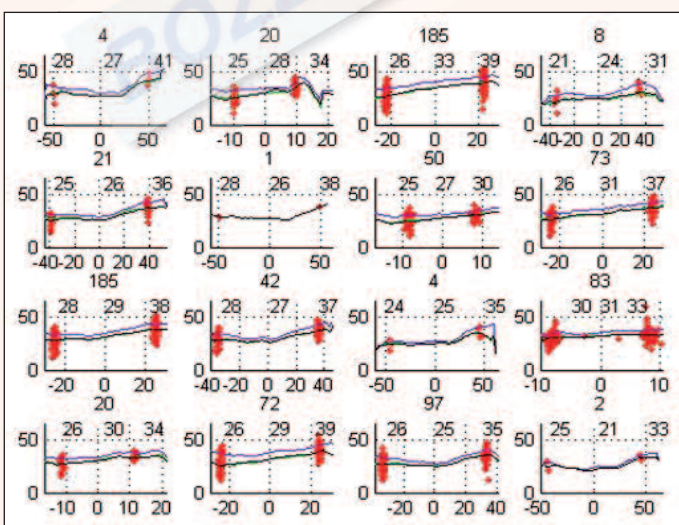


Figura 7 - I diagrammi di velocità per ogni possibile movimento per veicoli leggeri con velocità minima di ingresso maggiore di 10 km/h, valori medi (nero), V_{85} (viola), V_{50} (verde), deviazione standard (arancione); in rosso, i punti di entrata e uscita (al punto medio di ciascuna traiettoria è stata assegnata la progressiva 0 m) (in ascissa i metri, in ordinata i chilometri orari; il numero sopra ogni diagramma rappresenta il numero di casi)

Per ciascuna manovra sono stati quindi scelti:

- ♦ il 15° percentile dei valori di tortuosità (t_{15}) di tutte le traiettorie rilevate;
- ♦ l'85° percentile dei valori di velocità in ingresso ($V_{1,85}$), velocità intermedia ($V_{2,85}$) e velocità in uscita ($V_{3,85}$) indicate in Figura 8.

La scelta di questi due percentili, che individuano due insiemi di dati - velocità e tortuosità - numericamente identici, è coerente se si considera che il valore di riferimento della velocità operativa, riconosciuto a livello internazionale proprio nell'85° percentile della distribuzione delle stesse, può essere ragionevolmente atteso lungo quelle traiettorie con minore tortuosità, da cui la scelta del 15° percentile di queste come valori di riferimento. E' interessante notare come per questa associazione di grandezze si ottenga un discreto coefficiente di correlazione come indicato in Figura 9.

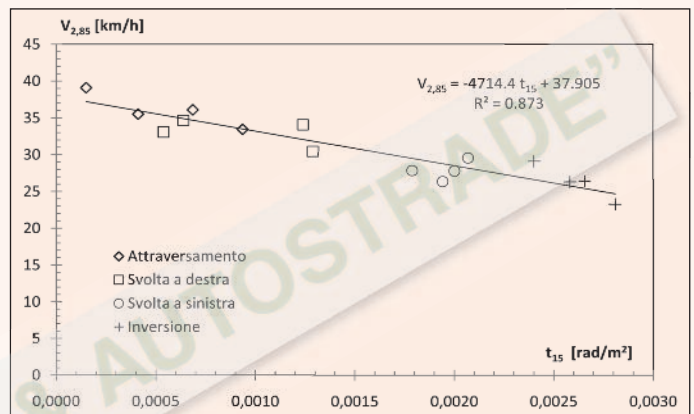


Figura 8 - La relazione tra tortuosità della traiettoria nell'anello circolatorio e la velocità operativa misurata nel tratto centrale della traiettoria

La relazione conferma e quantifica il legame tra la tortuosità della traiettoria e la velocità operativa attesa all'interno dell'anello. Da questo punto di vista il caso studio presenta un interessante risultato che riguarda le manovre di attraversamento (1,3) e (3,1).

La prima manovra (1,3) è caratterizzata da una tortuosità pari a $1 \cdot 10^{-4}$ rad/m² e lungo di essa è stata osservata una velocità operativa di poco superiore a 39 km/h, mentre nel caso della manovra corrispondente (3,1) il valore di tortuosità è notevolmente superiore di $9 \cdot 10^{-4}$ rad/m² e ad essa è associata una velocità operativa più bassa della precedente e pari a 33,4 km/h. Questa evidente differenza in termini di velocità e tortuosità si deve all'eccentricità del centro della rotatoria rispetto al punto di intersezione tra gli assi delle due strade.

Tale eccentricità misura quasi 4,8 m ed è tale che il centro della rotatoria risulti spostato verso il ramo 3 rispetto al punto di intersezione anzidetto. Per questo, la manovra (1,3) è caratterizzata da traiettorie così poco inflesse che dal punto di ingresso (ramo 1) sarebbe possibile percorrere traiettorie ideali pressoché lineari verso l'uscita (ramo 3).

Ad ulteriore conferma degli effetti prodotti dall'assetto geometrico scelto, si osservi la Figura 10 che riporta le variazioni di velocità in ingresso - $\Delta(V_{1,85} - V_{2,85})$ - e in uscita - $\Delta(V_{3,85} - V_{2,85})$ - sempre in funzione del quindicesimo percentile della tortuosità delle traiettorie. Se in ingresso si ottiene sempre una riduzione della velocità con valori che crescono al crescere delle tortuosità, nel caso di traiettorie poco tortuose, in particolare per valori di t_{15} inferiori a $1,35 \cdot 10^{-3}$ rad/m², le velocità nell'anello tendono a essere superiori a quelle della sezione di uscita e la differenza diventa così negativa.

Altri approfondimenti sono stati eseguiti allo scopo di verificare l'utilità degli strumenti di analisi disponibili in commercio e descritti in letteratura. E' il caso del codice Torus (prodotto dalla Transoft Solutions Inc.)

impiegato al fine di determinare le velocità operative di tutte le manovre considerate sulla base dei vincoli geometrici dovuti all'organizzazione dei cigli di ingresso e di uscita, degli assi dei rami confluenti e dell'anello interno. A scopo informativo, si segnala che il metodo di analisi impiegato da Torus deriva dalla metodologia previsionale riportata nel documento NCHRP 672 [4].

I risultati del confronto sono riportati in Figura 10, da cui si evince che se per la manovra di attraversamento la previsione di Torus è in linea con le osservazioni eseguite per il caso studio, non altrettanto si può dire per le manovre di svolta a destra e a sinistra per le quali le previsioni si allontanano di circa il 20% dai valori osservati.

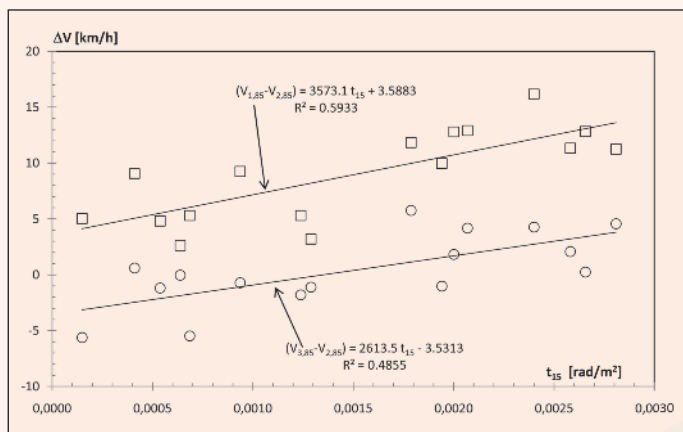


Figura 9 - Le variazioni di velocità in ingresso $[\Delta(v_{1,85}-v_{2,85})]$ e in uscita $[\Delta(v_{3,85}-v_{2,85})]$ in funzione del 15° percentile della tortuosità

In particolare, se per la svolta a destra la previsione sovrastima l'osservazione, nel caso della svolta a sinistra il codice impiegato sottoestima i valori misurati mediante l'analisi delle immagini.

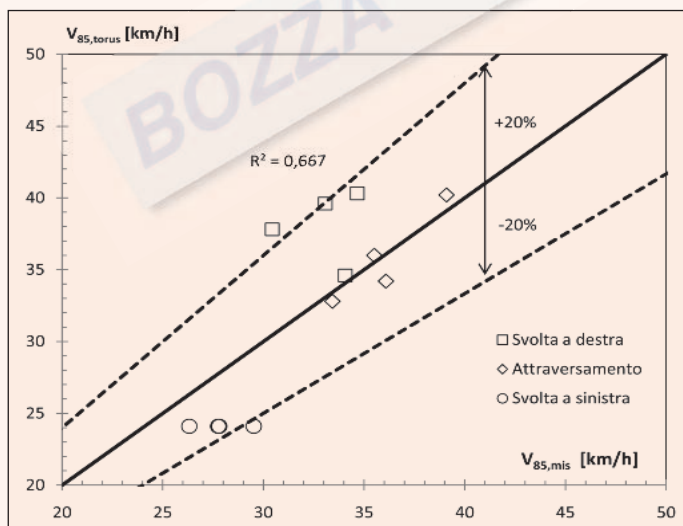


Figura 10 - Il confronto tra le velocità operative misurate ($V_{85,mis}$) e le velocità previste mediante il codice Torus ($V_{85,torus}$)

Riconoscimenti

Le attività presentate in questo articolo sono state finanziate con i fondi del progetto PRIN 2007 "Intersezioni stradali a raso, criteri di scelta della tipologia e dimensionamento: aspetti funzionali delle rotatorie non semaforizzate", contratto n° MO08RISTO1.

Conclusioni

La valutazione delle prestazioni operative di un'infrastruttura stradale richiede la conoscenza dettagliata di una serie di dati che, con la tecnologia dell'analisi delle immagini, è possibile ricavare da rilievi con videocamera digitale direttamente sul campo. Le intersezioni a rotatoria rappresentano un caso assai indicativo di quanto le caratteristiche geometriche incidano in modo determinante su velocità e traiettorie dei veicoli. Il lavoro presentato in questa memoria propone una metodologia di analisi basata sull'elaborazione delle immagini, in grado di estrarre, dai rilievi effettuati con videocamera, la matrice E/U, la composizione del traffico, le traiettorie dei singoli veicoli e i diagrammi di velocità. Poiché la tecnica richiede una trasformazione omografica dei fotogrammi, e considerato che essa risulta intrinsecamente sensibile ad alcuni fattori ambientali e all'occlusione tra veicoli dipendente dal punto di osservazione, il risultato ottenuto è affetto da un errore che può essere convenientemente ridotto attraverso l'utilizzo di specifici algoritmi che gli autori hanno implementato all'interno del software VeTRA. Su tutte le analisi eseguibili con l'impiego di VeTRA è stata eseguita una verifica a posteriori dell'errore. Sia nel caso della valutazione delle matrici E/U sia dello studio delle traiettorie, esso è risultato molto basso pur con alcune inevitabili differenze dovute essenzialmente ai fenomeni di occlusione e di distorsione prospettica.

A tale proposito, i futuri sviluppi della ricerca permetteranno di affinare ulteriormente la tecnica di rilievo e di elaborazione dei dati. In particolare, grazie all'impiego di più videocamere poste lateralmente e/o centralmente, saranno superati i problemi di occlusione o distorsione prospettica. Contestualmente, sarà anche possibile estendere il campo di analisi ai bracci sia per la misura diretta del tempo di attesa dei veicoli sia per la misura sempre diretta di altre grandezze utili nell'analisi funzionale quali il tempo di follow-up, il gap e il lag.

Rimanendo nell'ambito del lavoro sin qui svolto, appaiono di un certo interesse i risultati delle analisi delle traiettorie e dei relativi diagrammi di velocità. Se da un lato confermano quanto già indicato nella letteratura tecnico-scientifica di settore, dall'altro permettono di quantificare il legame diretto che esiste tra la tortuosità delle traiettorie, come risultato dell'organizzazione geometrica dell'intersezione, e le velocità operative attese utilizzabili anche nella valutazione ex-ante della soluzione progettuale.

* Professore Associato in Trasporti ICAR/05 del Politecnico di Milano BEST

** Professore Associato in Strade, Ferrovie e Aeroporti ICAR/04 del Politecnico di Torino DITIC

*** Ricercatore in Sistemi di Elaborazione delle Informazioni ING-INF/05 del Politecnico di Milano DEI

**** Contrattista del Politecnico di Milano DEI

BIBLIOGRAFIA

- [1]. L. Mussone, M. Matteucci, A. Bonarini, M. Bassani - "Ricostruzione delle traiettorie veicolari nelle intersezioni a rotatoria con tecniche di elaborazione delle immagini", "Strade & Autostrade", n° 81/2010, pp. 164-170, 2010.
- [2]. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2006), "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali. Decreto 19 Aprile 2006", in "Gazzetta Ufficiale", Serie Generale, anno 147, n° 170, 24 Luglio.
- [3]. P. Cialdini - "Sulla Cogenza della Norma nel Progetto di Strade", 2010.
- [4]. TRB (2010) NCHRP Report 672 - "Roundabout: an Informational Guide", Second Edition, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C..