

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN

INGEGNERIA PER L' AMBIENTE E IL TERRITORIO

GOVERNO DELLE TRASFORMAZIONI TERRITORIALI

CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE

N° 8

DIPARTIMENTO DI TRASPORTI

“Luigi Tocchetti”

Anno Accademico 2010-2011

ABSTRACT

TARATURA E VALIDAZIONE DI MODELLI DI VELOCITA'

OPERATIVA

Candidata

Chiara Granata

matr. 324/166

Relatori

Prof. Renato Lamberti

Prof. Gianluca Dell'Acqua

Correlatrice:

Ing. Francesca Russo

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro di Tesi svolto presso il Dipartimento di Trasporti "Luigi Tocchetti" si inquadra all'interno di un Progetto di rilevante interesse nazionale PRIN 2008, che ha come Coordinatore Scientifico il *Professor Renato Lamberti* e coinvolge, oltre all'Ateneo di Napoli, anche le Università di Trento, Trieste, Cagliari, Bari e Firenze.

Il lavoro di ricerca dal titolo "*Valutazione del comportamento del guidatore mediante il diagramma delle velocità e modellazione degli effetti sull'incidentalità*" si compone di 4 Fasi operative.

Il lavoro di Tesi si innesta nella prima delle quattro fasi, che prevede l'elaborazione di *Modelli predittivi delle velocità in condizioni di flusso ininterrotto*, proponendo di applicare metodologie statistiche di interpretazione dei dati rilevati, che consentono di individuare le variabili significative che influenzano effettivamente le velocità adottate dagli utenti stradali.

L'approccio corrente alla progettazione stradale, richiede che vengano effettuate delle verifiche di congruenza del tracciato, atte a garantirne la rispondenza alle esigenze di regolarità ed omogeneità tra il susseguirsi degli elementi, verticali ed orizzontali, che lo compongono, la sensibilità al territorio attraversato e l'adeguata percezione degli utenti, in maniera da rispondere alle loro aspettative e garantirne la sicurezza.

Le attuali *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade* prescrivono che vengano soddisfatte le condizioni geometriche atte a garantire che:

- ⊗ Il conducente assuma uno stile di guida attento ed equilibrato;
- ⊗ Sia sempre assicurata una visibilità distinta e corretta dello spazio stradale, entro il quale poter eseguire in sicurezza le manovre di arresto e laddove è possibile, quelle di sorpasso e di cambio corsia;
- ⊗ Assicurare l'equilibrio dinamico del veicolo in condizioni dinamiche anche difficili.

Nell'ambito del regolare iter progettuale il progettista acquisisce, a seguito delle suddette verifiche, gli elementi indispensabili per apportare gli eventuali miglioramenti geometrici dell'andamento planimetrico, altimetrico e trasversale del solido stradale.

Elemento imprescindibile dal quale partono le valutazioni sulla congruenza del tracciato in fase progettuale è il diagramma delle velocità di progetto, tuttavia anche in Italia si è diffusa l'opinione, già consolidata a livello internazionale, che al fine di effettuare verifiche di congruenza più aderenti e cautelative ci si debba riferire ad altri valori di velocità, rappresentativi del reale comportamento del guidatore, in questo senso trova impiego la velocità operativa.

La velocità operativa è identificata nello studio con la velocità al di sotto della quale viaggiano l'85% dei guidatori su un particolare elemento geometrico in condizione di flusso libero, strada asciutta, buone condizioni meteorologiche e luce diurna.

Il comportamento dell'utente stradale può essere influenzato da una somma di fattori, quali le caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico dei tracciati, le ragioni dello spostamento, le specificità ambientali, le specificità dell'area, che incidono sulle diverse scelte dello stesso.

Osservando il problema fisico, si può comunque dire che le reazioni del guidatore agli stimoli sono assimilabili ad una continua modifica di intensità e di direzione del vettore delle velocità, motivo per il quale il "Comportamento" può essere studiato attraverso l'analisi e la conoscenza di tale vettore.

Le attività di ricerca avrebbero mostrato che gli utenti preferiscono più frequentemente sacrificare il comfort e la sicurezza di guida, anziché accettare il disagio indotto da una velocità di avanzamento ridotta a causa di anomalie distribuite lungo il tracciato viario.

La velocità, dunque, sembrerebbe interpretare in maniera adeguata la maggior parte dei fenomeni che si verificano su una infrastruttura stradale, per larga parte della comunità scientifica che si occupa di tali problemi.

2. OBIETTIVI

Il presente lavoro di tesi illustra la metodologia impiegata per la elaborazione di modelli predittivi della velocità operativa, capace di rappresentare, nella fase di progettazione preliminare delle infrastrutture viarie, il reale comportamento di guida degli utenti su strade che attraversano l'ambito extraurbano, che possano essere applicati su strade che presentino caratteristiche geometriche e funzionali analoghe a quelle del campione impiegato per la taratura.

I modelli proposti sono in grado di restituire il comportamento di guida degli utenti in termini di V_{85} , correlando, dunque, le caratteristiche del tracciato alla condotta dell'utente stesso.

Nota la velocità operativa, attraverso l'applicazione dei modelli predittivi proposti, è possibile elaborare il diagramma delle velocità, attraverso il quale, il Progettista effettua le verifiche di comfort, sicurezza ed equilibrio dinamico dei veicoli, per garantire l'omogeneità e l'armonia degli elementi di base, costituenti il tracciato d'asse. Tale diagramma potrà essere adottato sia per la progettazione dei singoli elementi plano-altimetrici di un tracciato stradale sia per le verifiche di congruenza del tracciato considerato nel suo insieme. Si ottiene così la formulazione di criteri di dimensionamento geometrico dei vari elementi di un tracciato stradale più vicini al reale comportamento di guida dell'utente.

La calibrazione, pertanto, di adeguati modelli di previsione della velocità operativa su strade esistenti, consente di evitare l'azione di monitoraggio, come richiesto dalla Normativa (Bozza di adeguamento delle strade esistenti), per la definizione della V_{85} in sito, ed utilizzare equazioni ad hoc opportunamente validate a priori.

La scelta di effettuare la calibrazione dei modelli predittivi della velocità operativa su strade appartenenti alla viabilità della Provincia di Belluno e la successiva fase di validazione degli stessi su strade appartenenti a quella della Provincia di Salerno, che presentano analoghe caratteristiche geometriche, trova riscontro nell'obiettivo di ricercare eventuali punti di contatto tra il comportamento di utenti così differenti tra loro.

Lo scopo ultimo è quello di calare i modelli di V_{85} su contesti geografici differenti per verificarne l'applicabilità ed esaminare la possibilità di realizzare un modello unico, utilizzabile su tutto il territorio nazionale.

3. RILIEVO DATI

La rete stradale, oggetto del presente studio in fase di calibrazione e taratura dei modelli di V_{85} , si sviluppa nel territorio della Provincia di Belluno ed è gestita da Veneto Strade - Direzione Operativa di Belluno, è costituita da 10 strade extraurbane, ad unica carreggiata prive di clotoidi, di cui lo sviluppo complessivo è di circa 150 km.



Rete Belluno: SR 48 Auronzo di Cadore - Falzarego



Rete Salerno: SS 426 Vallo di Diano

Le infrastrutture selezionate per la validazione dei modelli predittivi della velocità operativa appartengono tutte alla rete della viabilità ordinaria della Provincia di Salerno, in particolare le strade *SP 30B*, *SP 262*, *SP 312* sono situate nella Piana del Sele, mentre le strade *SP 52*, *SP 426 ed SP 166* nel Vallo di Diano.

Queste infrastrutture sono state selezionate in quanto presentano caratteristiche geometriche, di traffico ed ambientali analoghe al campione di strade utilizzate nella fase precedente di taratura dei modelli in esame. Lo sviluppo totale della rete impiegata in questa fase è di poco meno di 35 km.

La campagna di monitoraggio Conteggio-Traffico e Rilievo delle Velocità attuata sulla rete di calibratura e taratura dei modelli di V_{85} è stata opportunamente progettata da Veneto Strade per lo studio delle caratteristiche geometriche e funzionali con l'obiettivo di rilevare la condotta degli utenti esclusivamente su tronchi geometrici in rettilineo e curva circolare, escludendo le possibili variazioni di velocità sulle zone di transizione impegnate per decelerare nella fase d'ingresso - curva e/o accelerare nella fase di allontanamento.

Lo studio della rete in questa fase ha previsto una fase di geometrizzazione dei 10 tracciati in esame, il posizionamento delle sezioni di rilievo, collocate a centro degli elementi curvilinei circolari, al centro degli elementi rettilinei con lunghezza inferiore ai 250 m ed al primo, centro e terzo quarto per rettilinei con lunghezza superiore ai 250 m. Si è poi proceduto al rilievo delle caratteristiche geometriche (sviluppo degli elementi, pendenze longitudinali e trasversali, Raggio di curvatura, indice di tortuosità dell'elemento curva, indice di tortuosità del tronco omogeneo etc) e funzionali (V_{85} e V_m , presenza segnaletica, stato della pavimentazione) dei tronchi monitorati.

I dati relativi alle 6 strade ricadenti nella Provincia di Salerno ed impiegati per la fase di validazione provengono da una articolata campagna di monitoraggio delle velocità e conteggi veicolari di una parte delle Strade Statali e Provinciali della viabilità Salernitana, avviata in collaborazione tra la sezione Strade del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" e la Provincia di Salerno dal 2003.

L'organizzazione della campagna di rilievi ha seguito criteri differenti dalla campagna di monitoraggio della rete utilizzata nella fase di calibratura. Delle sezioni disponibili sono state utilizzate quelle in centro curva, sulle quali sono stati validati i modelli predittivi della velocità operativa elaborati su queste sezioni in fase di calibratura e taratura; si è proceduto

analogamente per le sezioni in rettilo e per le sezioni di centro elemento, sia esso curva o rettilo.

a. Calibrazione e Taratura di modelli predittivi della V_{85}

L'elaborazione dei modelli predittivi della V_{85} è stata effettuata applicando delle procedure statistiche.

La calibrazione e la taratura dei modelli sul parte della rete della viabilità ordinaria della Provincia di Belluno, è stata sviluppata con processo iterativo applicando l'ordinario metodo dei minimi quadrati con regressione multipla non lineare, secondo l'algoritmo di Gauss – Newton, basato sull'espansione in serie di Taylor della funzione proposta.

Si è proceduto partendo da formulazioni semplici con due variabili ed attraverso diverse iterazioni è stato possibile stabilire formulazioni via progressivamente più efficaci in termini di incremento ρ^2 .

Le equazioni implementate per la previsione della velocità operativa sono state differenziate come segue:

- ∞ 7 Modelli di Previsione della V_{85} per Curve Circolari Planimetriche, adottando 236 misure di Velocità operativa in corrispondenza delle sezioni di centro-curva;
- ∞ 5 Modelli di Previsione della V_{85} per tronchi geometrici stradali in Rettilo, adottando 327 misure di Velocità in corrispondenza delle sezioni di centro-rettilo, primo e terzo quarto dello sviluppo dello stesso elemento;
- ∞ 6 Modelli di Previsione della V_{85} applicabili validi sia per curve circolari che per rettili, adoperando 405 misure di Velocità in corrispondenza delle sezioni di centro-rettilo e centro-curva;
- ∞ 6 Modelli di Previsione della V_{85} per Curve Circolari suddividendo il database in classi funzione del raggio variabile con passo costante di 50 metri. Le misure di Velocità impiegate corrispondono alle sezioni di centro-curva;
- ∞ 11 Modelli di Previsione della V_{85} per Rettili con suddivisione del database in classi per uno sviluppo dell'elemento variabile con passo di metri 50. Le misure di Velocità impiegate corrispondono alle sezioni di centro-rettilo, primo e terzo quarto;

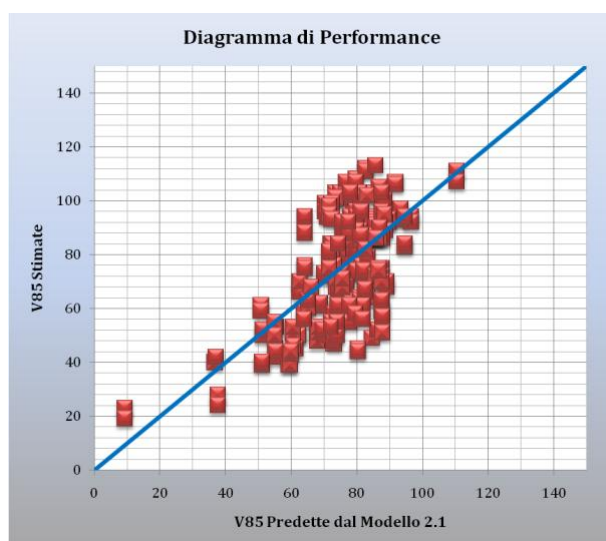


Diagramma di Performance del Modello 2.1 per sezioni in centro curva

Di seguito si riportano le espressioni dei migliori modelli proposti per la stima della velocità operativa sui elementi circolari curvilinei e su rettilineo, nonché il modello proposto per entrambi gli elementi, con l'introduzione della variabile "raggio di curvatura", che consente di adattare il modello alle due diverse tipologie:

$$v_{85} = 61,97 - 1,36 \cdot 10^{-5} * CCR_{Scp}^2 - 6,05 \cdot 10^{-2} * CCR_m - 15,31 * P_{longitudinale} - 9,00 * |P_t| + 13,16 * L_{corsia}$$

Rettilineo

$$\rho^2 = 0,82$$

$$v_{85} = 66,85 + -2,09 \cdot 10^{-2} * CCR_m - 3,19 \cdot 10^{-2} * CCR_s + 8,10 \cdot 10^{-6} * CCR_s^2 - 11,53 * P_{segnalata} + 5,91 \cdot 10^{-1} L_{corsia}^3 +$$

Curva

$$+ 4,61 \cdot 10^{-2} * S_e - 9,43 \cdot 10^{-5} * S_e^2$$

$$\rho^2 = 0,91$$

$$v_{85} = 80,33 - 1222,73 * \frac{1}{R} - 5,65 \cdot 10^{-2} * CCR_m - 2,93 \cdot 10^{-1} * P_{long}^2 + 1,99 * L_{carreggiata}$$

Curva/rettilineo

$$\rho^2 = 0,65$$

Per stimare la buona taratura dei modelli sono stati elaborati per ciascuno dei modelli di velocità operative dei diagrammi di Performance, che restituiscono visivamente la disposizione dei valori di V_{85} predetta e stimata. La nube dei punti, fittamente distribuita intorno alla bisettrice del primo quadrante, evidenzia una giusta taratura del modello, mostrando una simmetrica dispersione dei punti.

Si precisa, tuttavia, che la ricerca della forma funzionale del modello predittivo, è stata precorsa dalla stima dell'indice di correlazione di Pearson, anche detto coefficiente di correlazione di Pearson (o di Bravais-Pearson) tra due variabili aleatorie, che esprime la linearità tra la covarianza di due variabili ed il prodotto delle rispettive deviazioni standard.

I modelli sono stati accettati quando presentavano un coefficiente ρ^2 maggiore del 40%, un livello di significatività dei coefficienti stimati $\alpha < 5\%$, e quando essi rappresentavano in maniera coerente il fenomeno fisico al quale erano riferiti.

b. Validazione dei modelli predittivi della V_{85}

La fase di validazione dei modelli predittivi della velocità operativa, prevista per testarne l'affidabilità e l'efficacia, è stata condotta utilizzando un campione di strade extraurbane ricadenti nella rete viaria della Provincia di Salerno.

Dalla applicazione delle formulazioni ritenute più efficaci sono stati ottenuti gli scarti tra le velocità stimate dal modello e quelle ottenute dai rilievi, per valutare la bontà dei residui così ottenuti sono stati associati agli stessi tre indicatori statistici sintetici, infatti una buona tecnica di regressione deve limitare al minimo le differenze tra i valori osservati e quelli previsti. Gli indicatori utilizzati sono i seguenti:

- **MAD (Mean Absolute Deviation)** = Rapporto tra il valore assoluto della somma degli scarti D_i e il numero n dei siti osservati sul tracciato stradale

$$MAD = \sum_{i=1}^n |D_i| / n$$

- **MSE (Mean Squared Error)** = Rapporto tra la somma degli scarti D_i al quadrato e il numero n dei siti osservati

$$MSE = \sum_{i=1}^n D_i^2 / n$$

- I = Rapporto tra lo scarto quadratico medio degli errori e la media dei valori predetti delle velocità operative

$$I = \sqrt{MSE} / \left(\sum_{i=1}^n V_{(operating\ speed\ model)} / n \right)$$

c. Costruzione degli Abachi associati ai modelli predittivi della V₈₅

Al fine di fornire un valido strumento per un agevole utilizzo dei modelli predittivi della velocità proposti, sono stati poi elaborati degli Abachi. L'impiego di questi grafici è estremamente immediato, l'utente entrando con un valore di una variabile e conoscendo i range di valori all'interno dei si aggirano le altre variabili considerate può scegliere la curva corrispondente, grazie alla quale, interpolando, otterrà il valore di velocità operativa cercato.

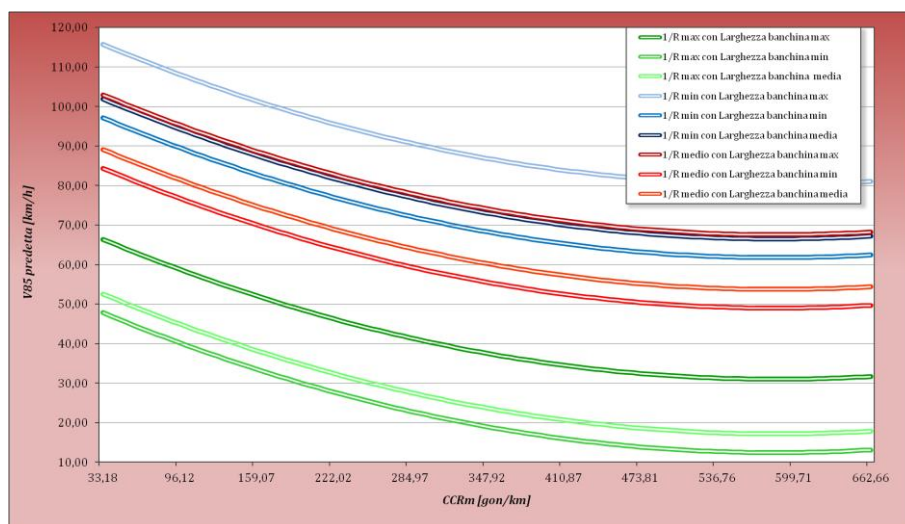


Figura 1 Abaco applicativo del modello 3.2 ottenuto per sezioni di centro curva

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI DELLO STUDIO

I risultati cui si è pervenuti nello svolgimento del presente lavoro di Tesi riguardano la costruzione di differenti modelli di previsione della velocità operativa attraverso tecniche di regressioni multiple non lineari, secondo l’algoritmo di Gauss – Newton, basato sull’espansione in serie di Taylor della funzione proposta.

L’obiettivo principale è stato quello di analizzare l’influenza delle caratteristiche geometriche e funzionali dei tronchi in esame sulla velocità attuata dai guidatori.

La fase di calibrazione dei modelli ha evidenziato tutte le difficoltà connesse allo studio, palesando la complessità del fenomeno in esame.

I modelli tarati sul campione di 10 strade extraurbane ad unica carreggiata e prove di clotoidi, appartenenti alla rete della Provincia di Belluno, presentano un coefficiente di determinazione compreso tra il 41% ed il 91%. Sono stati ottenuti modelli di previsione della V₈₅ per elementi curvilinei circolari, impiegando le sole sezioni di centro curva, per tronchi geometrici in rettilineo, con l’impiego delle sezioni monitorate al primo, centro e terzo quarto dello sviluppo,

e modelli unici di previsione della V_{85} da impiegare indistintamente sia per le sezioni geometriche in curva che in rettilineo.

La velocità operativa predetta per le sezioni di centro curva evidenzia una forte correlazione con l'indice di tortuosità della curva stessa e del tronco in cui essa è inserita, ma anche con la presenza della segnaletica, con la larghezza della corsia, con lo sviluppo dell'elemento ed il tasso di variazione della curvatura, nonché relazione con la lunghezza del rettilineo che precede l'elemento. Per quanto concerne i due indici di tortuosità (CCRs e CCRm), si comprende come sia importante osservare in che modo il singolo elemento curva, si inserisca all'interno del tracciato: è chiaro che una curva a parità di raggio, possa influire in maniera differente sulla velocità attuata dal guidatore se inserita in un tracciato più o meno tortuoso.

Nei modelli di previsione della velocità operativa per le sezioni in rettilineo sono state introdotte le variabili relative all'elemento stesso, quali la pendenza trasversale e longitudinale, che sono risultate più significative rispetto ai modelli calibrati per gli elementi curvilinei circolari, e lo sviluppo dell'elemento. Sono risultate altresì significative le correlazioni tra V_{85} e caratteristiche dell'elemento – curva che precede: appaiono rilevanti sia la distanza della sezione monitorata dalla curva che precede, sia lo sviluppo della stessa, che il suo indice di tortuosità.

Anche nel caso dei rettilinei, come per le curve, è di fondamentale importanza come l'elemento sia inserito nel tracciato, poiché a parità di condizioni geometriche, esso può influire in maniera differente sulla velocità dell'utente in funzione della tortuosità complessiva del tronco. I modelli unici di previsione della V_{85} da impiegare indistintamente sia per le sezioni geometriche in curva che in rettilineo prendono in considerazione variabili come il raggio o analogamente la curvatura, in maniera da poter adattare il modello alle due diverse condizioni planimetriche. Le variabili risultate significative in questo caso sono lo sviluppo dell'elemento, l'indice medio di tortuosità del tronco, la larghezza della carreggiata e la pendenza longitudinale. I modelli che sono risultati migliori dal punto di vista della significatività statistica ed interpretazione del fenomeno osservato restituiscono, per i due sensi di marcia, il valore della V_{85} , in km/h, variabile per ogni generica posizione individuata sul tronco stradale, sia essa posizionata in rettilineo che in curva. Pertanto le formulazioni finali suggerite consentono di ottenere un profilo della velocità in rettilineo variabile da sezione a sezione, dimostrando quindi che il comportamento di guida degli utenti non può essere assimilato, come molti modelli in letteratura presentano, ad un profilo costante. I modelli calibrati sono stati di conseguenza validati applicandoli su un campione di strade extraurbane ad unica carreggiata e prove di clotoidi, appartenenti alla rete della Provincia di Salerno, non rientrati nel campione di calibrazione. Gli elementi planimetrici rilevati presentano caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico assimilabili alle prime impiegate nella fase di taratura. La procedura di validazione ha dimostrato di conseguenza una buona adattabilità dei modelli elaborati ad un contesto geografico differente; tale considerazione è supportata dalla valutazione di indicatori statistici sintetici, che hanno confermato la correttezza delle equazioni di regressione, restituendo un ridotto scostamento dei valori predetti da quelli osservati.

Nello studio, a completare i modelli sono stati introdotti anche degli abachi relativi agli stessi. L'utilizzo di tali abachi è stato proposto per rendere più semplice ed immediata l'applicazione

dei modelli, entrando con un valore di una variabile e conoscendo il range di valori all'interno dei quali si aggirano le altre variabili considerate, si può scegliere la curva corrispondente e leggere il rispettivo valore di V_{85} , espresso in km/h, dell'elemento considerato.

I modelli di previsione della velocità operativa consentono, di norma, l'identificazione dei valori di velocità degli elementi principali che si susseguono lungo il tracciato, per la costruzione di profili completi occorrerebbe integrare lo studio con l'individuazione dei tronchi di transizione rettilineo - curva - rettilineo, quelli cioè, in cui, in assenza delle clotoidi, si verifica la presenza di un moto decelerato e/o accelerato.

I modelli formulati riguardano solamente condizioni diurne e meteorologiche favorevoli, si apre quindi la possibilità di verificare l'applicabilità degli stessi a contesti e condizioni differenti.

Un'ulteriore possibilità di studio è quella di considerare l'influenza sulle condizioni di velocità degli accessi, delle intersezioni e della distanza di visibilità, integrando il Data Base con l'introduzione di queste variabili. In ultimo, per ottenere dei profili di velocità continui anche in presenza di intersezioni a raso, sarebbe auspicabile verificare la possibilità di integrazione dei diversi modelli realizzati per curve e rettilineo, con quelli da elaborare per le intersezioni.

Il fatto di avere lavorato su contesti geografici differenti ed aver verificato l'applicabilità dei modelli calibrati rende auspicabile la possibilità di realizzare un modello unico, utilizzabile su tutto il territorio nazionale.