

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

“FEDERICO II”



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI TRASPORTI "L. TOCCHETTI"

TESI DI LAUREA

**“MODELLI DI PREVISIONE DELLA VELOCITA' OPERATIVA SU
STRADE EXTRAURBANE LOCALI”**

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua

Candidata

Maria Rosaria De Filippo
matr. 324/175

Correlatrice

Dott. Ing. Francesca Russo

ANNO ACCADEMICO 2011/2012

➤ Introduzione

L'obiettivo delle analisi di seguito illustrate è la taratura di un modello di previsione delle velocità operative di validità nazionale. Le elaborazioni sono state eseguite trattando dati sperimentali rilevati in contesti territoriali differenti (Campania e Veneto).

In particolare il modello potrà essere impiegato per la previsione di velocità su elementi del tracciato a curvatura costante (curve circolari e rettili).

Il lavoro si inserisce nelle attività previste dal Progetto di Rilevante interesse Nazionale "Modelli predittivi della velocità operativa ed effetti sulla incidentalità stradale", avviato nel 2010 e coordinato dal Prof. Ing. Renato Lamberti; il progetto nazionale si articola nelle seguenti fasi:

1. conduzione di una campagna di indagini su tronchi stradali appartenenti a tutte le tipologie previste dalla Normativa Italiana vigente: a singola e doppia carreggiata, in ambito urbano ed extraurbano, in tronchi di strade extraurbane in attraversamento di centri abitati.
2. reiterazione delle misure proposte nella prima fase, applicate questa volta ai tronchi stradali che confluiscono nelle intersezioni lineari a raso e rotatorie, al fine di indagare sull'effetto delle loro presenza sulle velocità. Si svilupperanno quindi modelli dei profili delle velocità operative influenzate dall'aspettativa di intersecazione di flussi.
3. sistematizzazione dei dati geometrici, di traffico e di incidentalità delle strade osservate al fine di elaborare modelli predittivi dell'incidentalità congruenti con quelli costruiti per le velocità operative.
4. formalizzare modelli per la redazione dei diagrammi delle velocità operative, calibrati in differenti contesti territoriali, che potranno essere efficacemente inseriti nelle norme tecniche in vigore. Le norme prevedono ad oggi la costruzione del diagramma delle velocità di progetto, che non sono adeguate, ad interpretare il reale comportamento del guidatore. Per tale scopo saranno anche formulate proposte ragionate di aggiornamento delle norme vigenti (riguardanti le nuove costruzioni) e di integrazione di quelle in itinere, per gli adeguamenti delle infrastrutture esistenti.

Parte dei risultati del PRIN sono stati già diffusi in ambito internazionale come ad esempio i seguenti articoli scientifici:

- Dell'Acqua G., Russo F. *Road performance evaluation using geometric consistency and pavement distress data*. Transportation Research Record, 2011
- Dell'Acqua G., Russo F. *Safety Performance functions for low-volume roads*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2011
- Dell'Acqua G., Russo F. *Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2010
- Dell'Acqua G., Lamberti R., Russo F. *Road safety management using crash prediction models*. IRF BULLETIN Special Edition, Rural Transport, 2010

➤ Definizione del problema

Nel documento è illustrata la metodologia impiegata per la elaborazione di modelli predittivi della velocità operativa utile, nella fase di progettazione preliminare delle

infrastrutture viarie, per la interpretazione del *reale comportamento di guida degli utenti su strade* extraurbane locali assimilabile alle strade tipo F [DM 5.11.2001].

I modelli proposti restituiscono il comportamento di guida degli utenti correlando la V_{85} [85-esimo percentile della distribuzione delle velocità attuate in condizione di flusso libero, strada asciutta e buone condizioni meteorologiche] alle caratteristiche geometriche del tracciato.

Attraverso il diagramma delle velocità il Progettista può effettuare le verifiche di sicurezza e comfort, utili per garantire l'omogeneità relativa degli elementi geometrici costituenti la planimetria d'asse.

➤ **Stato dell'arte**

Molti studiosi si sono interessati al comportamento di guida dei conducenti e nella letteratura scientifica oggi, vari ricercatori hanno affrontato lo studio della velocità come parametro fondamentale di progettazione stradale.

- **Dell'Acqua e Russo(3)** hanno condotto analisi sperimentale strade a basso volume di traffico nel Sud Italia in assenza di curve di transizione tra elementi geometrici. I risultati sono stati utilizzati per sviluppare quattro modelli di previsione della velocità su rettili e curve.
- Una ricerca condotta da **Lazda, Smirnov(9)s**, nel 2009 riscontra problemi, ottenuti come il risultato di decisioni sbagliate effettuate da parte del conducente condizionate da decisioni tecniche.
I ricercatori hanno quindi suggerito una varietà di approcci analizzando il livello di traffico per la sicurezza stradale e alcune procedure basate sulla valutazione dei tassi di incidenti e degli infortuni.
- **Esposito, Mauro, Dell'Acqua e Russo(8)** illustrano un'analisi sperimentale condotta nel 2010 su un numero statisticamente significativo di sezioni stradali appartenenti alla rete di strade extraurbane a due corsie del Nord Italia. Lo scopo di questa ricerca è stato quello di sviluppare modelli di previsione di velocità operative su rettili e curve circolari per attuare analisi per la sicurezza stradale.
- Diverse analisi sperimentali esistono relative al comportamento del conducente sulla curva circolare in ingresso e in uscita come ad esempio **Louah et al.(7)**. In questo caso, alcuni ricercatori hanno analizzato i tassi di decelerazione e accelerazione della velocità sulle zone di transizione valutando la loro estensione che varia da curva a curva.
- Alcuni fattori possono influenzare la velocità di comportamento dei conducenti, come il dissesto della pavimentazione, così come analizzato nella ricerca di **Bogus et al. (5)**, che hanno proposto l'uso di indici di valutazione della qualità estrapolati nel caso di studio nel nord del New Mexico.
- **Fitzpatrick et al.(9)** hanno raccolto dati di velocità in 78 siti su strade di classi diverse in sei stati. Le sezioni sono state localizzate almeno 0,1 miglia (0,16 km) lontano da curve orizzontali e 0,2 miglia (0,32 km) di distanza dai segnali stradali o segnali di stop. I dati sulla larghezza della sezione trasversale, caratteristiche stradali, la densità di accesso sono stati raccolti in ogni sito. Almeno 100 misure di velocità sono state misurate su ciascun sito mediante l'uso di una pistola laser o classificatori di traffico.

Fatta eccezione per il limite di velocità e l'accesso della densità, nessuna altra caratteristica aveva una relazione con velocità operative.

I modelli rinvenuti in letteratura, pur fornendo importanti risultati di carattere generale ed individuando le variabili indipendenti utili per la correlazione della geometria degli elementi alle velocità, non hanno validità generale; il motivo è da ricercarsi nelle differenze, a volte sostanziali, tra una realtà nazionale e l'altra (e talvolta anche tra diverse realtà locali all'interno dello stesso Paese) in termini di orografia del territorio attraversato, condizioni climatiche, parco veicolare, abitudini degli utenti e caratteristiche delle reti.

➤ **Analisi dei dati**

La procedura di calibrazione e taratura dei modelli di previsione delle velocità operative su strade extraurbane locali, ha coinvolto parte della rete stradale che ricade nel territorio della Regione Veneto per un'estensione di 130 km circa e parte della rete della viabilità ordinaria della Regione Campania per un'estensione di 42 km circa. Le strade si collocano tutte in contesti territoriali pedemontani e/o pianeggianti. Nelle seguenti tabelle sono restituiti i dati principali relativi alle reti in esame: numero di sezioni monitorate [in curva e in rettilineo], la durata dei rilievi, ecc.

Tabella 1_Tabella Riepilogativa della rete stradale della Regione Veneto

VENETO					
STRADE MONITORATE	TOTALE SEZIONI MONITORATE	SEZIONI MONITORATE IN CURVA	SEZIONI MONITORATE IN RETTIFILLO	SVILUPPO km	ORE DI RILIEVO
SP 1	24	10	14	22.748	2016:00:00
SP 1 bis	50	23	27	13.346	1200:00:00
SP 2	12	3	9	8.371	528:00:00
SR 203	63	25	38	23.249	1512:00:00
SP 423	12	5	7	3.923	288:00:00
SP 251	24	11	13	25.711	744:00:00
SP 641	9	5	4	5.831	216:00:00
SR 348	30	14	16	12.633	720:00:00
SR 48	24	10	14	2.019	576:00:00
SR 355	27	11	16	12.636	648:00:00
totale	275	117	158	130.467	8448:00:00

Tabella 2_Tabella Riepilogativa della rete stradale della Regione Campania

CAMPANIA						
STRADE MONITORATE	TOTALE SEZIONI MONITORATE	SEZIONI MONITORATE IN CURVA	SEZIONI MONITORATE IN RETTIFILO	SVILUPPO km	ORE RILIEVO	DI
SP 30b	42	16	26	6.111	106:36:06	
SP 52	60	27	33	3.221	1254:18:21	
SP 312	80	52	28	8.272	1252:17:14	
SP 262	38	6	32	6.933	624:24:43	
SS 426	84	48	36	4.083	3501:54:01	
SS 166	99	84	15	5.013	23:04:38	
SS 103	55	24	31	2.674	165:00:00	
SP 135	51	40	11	5.689	162:05:24	
totale	509	297	212	41.996	7089:40:27	

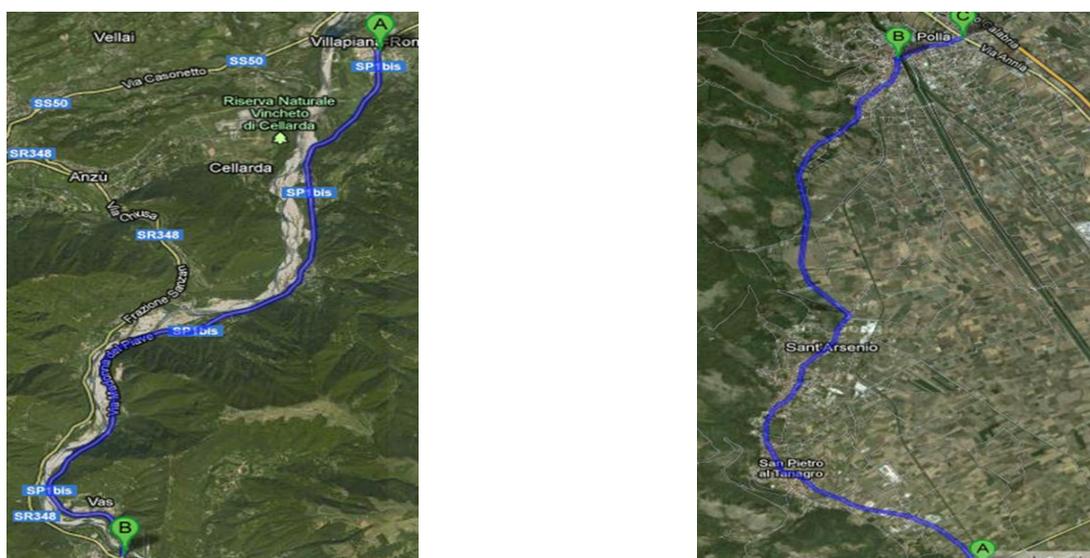


Figura1_Esempio di Tracciati stradali esaminati

La procedura di calibrazione presuppone la formalizzazione di tre differenti Data Base: uno contenente le sole misure realizzate in curva per un totale di 414 sezioni analizzate; uno contenente sezioni in rettilineo per un totale di 370 analizzate ed un database globale [784 sezioni di misura].

Le sezioni utili per la calibrazione e la taratura del modello rappresentano un sottoinsieme delle sezioni costituenti il data set generale. Un porzione delle sezioni di misura sono state destinate infatti alla formazione del campione di validazione dei modelli ed altre sono state escluse perchè ricadenti in zone di transizione [uscita/ingresso curva].

Per ciascuna infrastruttura si è proceduto alla redazione del profilo delle velocità attuate per il riconoscimento delle zone di transizione da escludere nella procedura di calibrazione e taratura dei modelli.

Le numerosità risultanti dei campioni, a seguito della fase di riconoscimento dei tronchi di transizione, sono restituite nella tabella seguente.

Tabella 3_Numerosità campionaria a seguito del riconoscimento delle zone di transizione.

sezione in curva rimanenti	sezione in rettilifo rimanenti	sezioni in transizione
233	157	119

➤ Taratura e Calibrazione

Successivamente i Data Base sono stati sottoposti ad una serie di operazioni di filtraggio in modo da escludere i punti anomali [velocità anormalmente elevate/basse per errore di misura e/o taratura degli strumenti]. Il filtraggio è stato eseguito con le tecniche di Chauvenet e Vivatrat.

La calibrazione dei modelli è stata articolata in due fasi indipendenti per le curve ed i rettilifi.

Il motivo principale della distinzione è da attribuirsi al riconoscimento di comportamenti sostanzialmente diversi dei conducenti nella percorrenza delle curve e dei rettilifi, e dalla conseguente identificazione dei differenti parametri geometrici che influenzano gli stessi comportamenti.

La fase preliminare alla calibrazione e taratura dei modelli previsionali della velocità è stata quella del controllo statistico delle misure di velocità presenti nel Data Base tramite la Carta di Controllo.

La carta di controllo consente di rilevare, attraverso la valutazione della deviazione standard σ e della media μ campionaria, la presenza di eventuali anomalie nella distribuzione delle velocità.

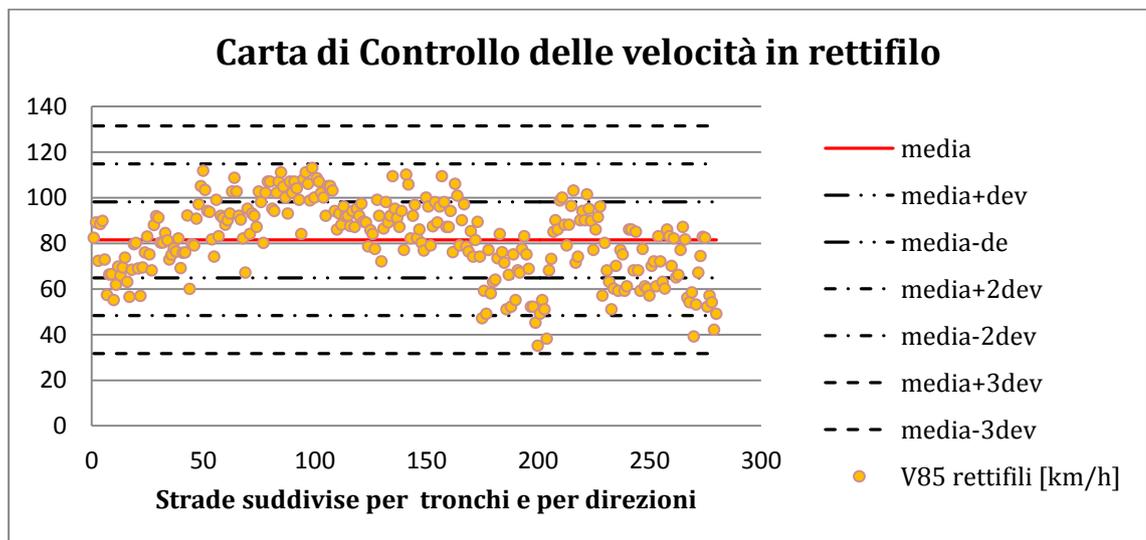


Figura 3_Carta di Controllo Statistico delle velocità operative misurate sulle sezioni in rettilifo per le Province di Belluno e di Salerno

Dopo aver valutato la bontà delle misure da utilizzare, è stato stimato l'indice di correlazione di Pearson, per ricercare l'espressione funzionale dei diversi modelli di previsione della velocità operativa in rettilifo.

L'analisi dell'indice di Pearson ha permesso di indagare sulla esistenza di eventuali legami lineari tra le coppie di variabili introdotte nello studio.

Per poter operare in maniera ottimale si è proceduto suddividendo il campione in sottogruppi.

La determinazione dei cluster è stata effettuata considerando le eventuali correlazioni, tra la velocità operativa e le variabili (matrice di Pearson).

La cluster analysis ha consentito di individuare gruppi di unità tra loro simili rispetto ad un insieme di caratteri presi in considerazione, e secondo un criterio dato. L'obiettivo che ci si pone è sostanzialmente quello di riunire unità tra loro eterogenee in sottoinsiemi tendenzialmente omogenei e mutuamente esaustivi.

I sottogruppi sono stati processati con il metodo di filtraggio di Chauvenet per la eliminazione di eventuali punti campionari anomali. Il metodo impiega si fonda sulla numerosità del sottogruppo poiché il numero di elementi consente la stima del percentile sulla curva di una Normale Gaussiana misura del percentile teorico (δx^{teor}) che diviene il limite al di sopra del quale tutte le misure di δx vengono escluse.

Il filtraggio è stato poi ulteriormente affinato mediante l'impiego del metodo di Vivatrat. Il metodo di Vivatrat si basa sulla stima di intervalli che possono essere considerati fluttuazioni delle misure "normali" rispetto ai valori stimati come "anomali". La procedura Vivatrat può essere sintetizzata nei seguenti punti:

Si suddividono le misure in finestre spaziali di ampiezza D, che individuano dei sottogruppi. Si calcolano il valore medio μ e lo scarto quadratico medio σ per ogni sottogruppo. Si calcola "la dispersione rappresentativa" S_r definita come valore minimo tra le seguenti espressioni:

$$S_r = \frac{1}{2} (S_{i+1} + S_i)$$

$$S_r = \frac{1}{2} (S_{i-1} + S_i)$$

$$S_r = \frac{1}{2} (S_{i+1} + S_{i-1})$$

In cui S_{i+1} , S_{i-1} ed S_i sono le deviazioni standard calcolate per i sottogruppi (i+1)-esimo, (i-1)-esimo ed i-esimo rispettivamente;

Si eliminano le misure che non ricadono nell'intervallo $\mu_i \pm A \cdot S_r$ dove μ_i è il valore medio delle misure appartenenti ad ogni sottogruppo i, S_r è la deviazione standard caratteristica ed A è il coefficiente che definisce l'ampiezza del semi-intervallo considerato accettabile per i valori assunti dalle misure. I valori del parametro A devono essere contenuti tra i seguenti valori $2.5 > A > 0.5$

➤ Sintesi dei modelli Calibrati

Tutti i modelli calibrati per gli elementi geometrici circolari e rettilinei e quello unitario sono proposti nella Tabella seguente.

Equazione dei modelli predittivi di V_{85}			
modello		equazione	ρ^2
modelli per sezioni in rettilineo	1 Chauvenet	$V_{85} = 75.25 + 9.15 * \log(\text{lunghezza}) + \exp(0.36 * l \text{ arg})$	0.68
	2 Chauvenet	$V_{85} = 96.60 + 0.0007 * \exp(\text{largh}) - 0.05 * CCRm + 4.28 * \log(\text{lungh}) - 0.53 * \text{num.accessi}$	0.60
	3 Vivatrat	$V_{85} = 76 - 0.06 * CCRm + 2.07 * l \text{ arg}$	0.76
modelli per sezioni in curva	4 Chauvenet	$V_{85} = 11.77 * l \text{ arg} - 882.1 * \frac{1}{R}^{0.7}$	0.99
	5 Chauvenet	$V_{85} = 103.5 * \exp(\text{lungh}) - 1462.33 * \frac{1}{R}^{0.7}$	0.92
	6 Vivatrat	$V_{85} = 114.75 - 7036.54 * \frac{1}{R}$	0.92
modelli per curva e rettilineo	7 Chauvenet	$V_{85} = 103.96 + 5.32 * \log(\text{lungh}) - 0.061 * CCRm$	0.86
	8 Chauvenet	$V_{85} = 88.62 + 9.30 * \log(\text{lungh}) + 0.18 * l \text{ arg } h^2$	0.88
	9 Chauvenet	$V_{85} = 104.59 + 3.99 * \log(\text{lungh}) - 0.07 * CCRm - 1670 * \frac{1}{R}$	0.89
	10 Vivatrat	$V_{85} = 97.76 - 0.07 * CCRm - 1888.37 * \frac{1}{R}$	0.85

Tabella 4_Tabella sintetica dei Modelli calibrati per la stima della velocità operativa

➤ Validazione

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 misure non impiegate nelle fasi di calibrazione.

Per la valutazione dei residui [scarti tra le velocità stimate dal modello e velocità rilevate] sono stati calcolati tre indicatori statistici sintetici MAD , MSE e I . I risultati ottenuti sono risultati sempre statisticamente significativi.

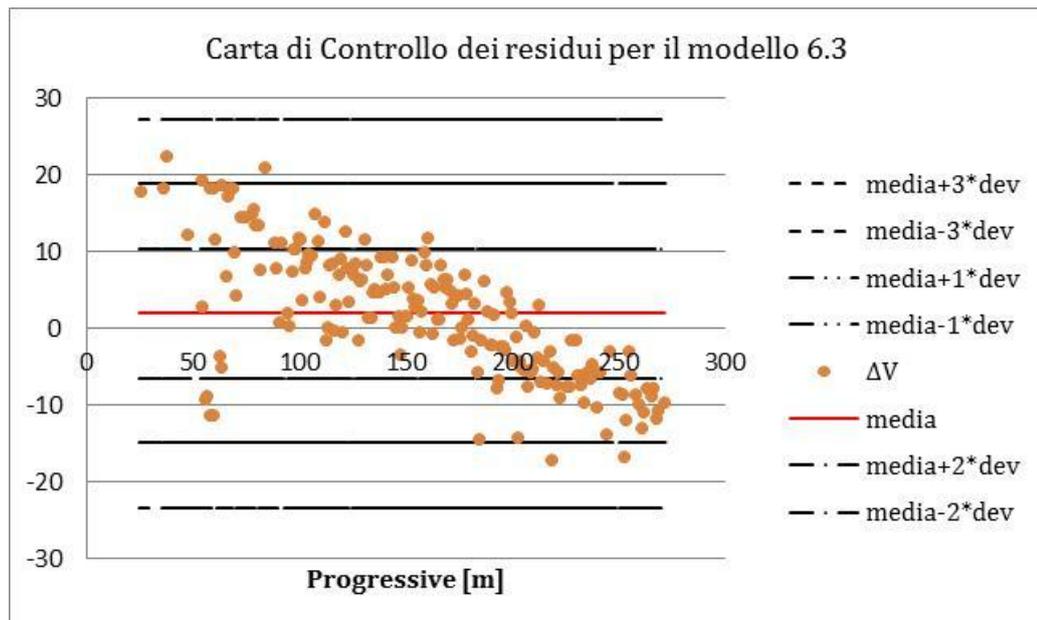


Figura 4_Diagramma dei residui per modello 9 relativo alle sezioni in rettilo e in curva

➤ Conclusioni e sviluppi futuri

I modelli elaborati possono essere utilizzati nella gestione di una rete stradale al fine di:

- Ricorrere al modello di previsione della velocità operativa sia per curve che per rettili per conoscere il reale comportamento di guida dell'utente.

Possibili sviluppi della ricerca riguardano:

- Estensione della base campionaria a nuovi contesti territoriali
- Calibrazione e validazione di modelli di previsione delle velocità operative per strade extraurbane secondarie
- Analisi di congruenza dei tracciati stradali esistenti
- Correlazione congruenza/incidentalità
- Ipotesi di interventi di adeguamento per la messa in sicurezza delle strade esistenti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Dell'Acqua G., Russo F. *Road performance evaluation using geometric consistency and pavement distress data*. Transportation Research Record, 2011
- Dell'Acqua G., Russo F. *Safety Performance functions for low-volume roads*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2011
- Dell'Acqua G., Russo F. *Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2010
- Dell'Acqua G., Lamberti R., Russo F. *Road safety management using crash prediction models*. IRF BULLETIN Special Edition, Rural Transport, 2010
- Bogus, S. M., G. C. Migliaccio, and A. A. Cordova. *Assessment of Data Quality for Evaluations of Manual Pavement Distress*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2170, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010
- Dell'Acqua, G., Lamberti, R. and Russo, F. (2010). *Road Safety Management Using Crash Prediction Models*. International Road Federation Bulletin, Special Edition Rural Transport, Volume 1, IRF Geneva – Switzerland
- Louah, G., Menacer, O., Dupré, G., Violette, E. (2009). *Updating French formulas for operating speeds on horizontal curves of rural two-lane highways*. Advances in Transportation Studies an International Journal
- Mauro, R., Russo, F. (2010). *Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents in Province of Belluno*. DIMS Report, University of Trento (Italy).
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., Wooldridge, M., Miaou, S. (2003). *Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Practices*. NCHRP Report 504, TRB, National Research Council