

# **VERIFICA DELLA CONGRUENZA DI UN TRACCIATO STRADALE CON IL MODELLO MOST E CONFRONTO CON ALTRE PROCEDURE ADOTTATE**

**AURELIO MARCHIONNA** Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Trieste  
**BRUNO CRISMAN** Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Trieste  
**ROBERTO ROBERTI** Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Trieste  
**PAOLO PERCO** Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Trieste

## **SOMMARIO**

Numerosi studi e ricerche hanno chiaramente evidenziato che l'impiego, per lo studio della composizione plano-altimetrica dell'asse stradale, della velocità di progetto non è più in grado di garantire la scelta di un tracciato con adeguati margini di sicurezza.

Negli ultimi anni molti paesi hanno già modificato le loro normative introducendo il concetto di velocità operativa, definita come 85%-ile della distribuzione della velocità rilevata su un elemento o su un tronco omogeneo di un tracciato con flusso incondizionato, e basano su di essa le principali verifiche relative alla congruenza del tracciato. Altri, quali gli Stati Uniti, pur non avendo modificato la normativa per la progettazione geometrica della strada, hanno avviato importanti studi volti a ricavare un efficace modello per la verifica della congruenza del tracciato basato sulle reali velocità praticate dagli utenti.

In questa nota, preliminarmente, vengono presentate le metodologie adottate in alcuni paesi per la verifica della congruenza di un tracciato. Viene quindi proposta una nuova procedura di congruenza che utilizza, per la previsione delle velocità operative, il modello MOST (Model of Operating Speed - Trieste) sviluppato dall'Unità Operativa dell'Università di Trieste nell'ambito del progetto di ricerca di interesse nazionale IASPIS. Questo modello consente di valutare la velocità operativa sulle strade extraurbane ad unica carreggiata a due corsie a doppio senso di marcia (C ed F del Nuovo Codice della Strada). La scelta, di definire in via prioritaria il modello per questo tipo di strade, è stata motivata da una parte dal notevole peso che questi tipi di strade hanno nell'ambito della rete italiana, dall'altra dalla notevole incidentalità che esse presentano.

E' stato infine ipotizzato un tracciato per una strada extraurbana di tipo C, secondo la nuova proposta di normativa italiana predisposta su iniziativa del Ministero dei Lavori Pubblici. E' stata poi effettuata un'analisi di confronto del tracciato sia con le prescrizioni e le regole di congruenza delle normative straniere più evolute sia con il nuovo modello qui proposto.

## **ABSTRACT**

In the last years many studies have clearly shown that the use, in road geometric design, of a conventional speed, like the design speed, is not more in a position to guaranteeing adapted safety margins. The driver, in fact, for the continuous evolution of the performances of the vehicles, covers the road elements with speeds higher than conventional speeds of reference. The differences found between the previewed speeds and observed ones can make useless the employment, for the verifications of alignment consistency, of criteria based on the control of the differences between the design speeds of the contiguous geometric elements. Many countries already have modified

their standards, introducing the concept of operating speed, defined like 85%-ile of the distribution of the speed found on an element or a homogenous sections of a road with unconditioned flow, and base on it the main relative verifications to the consistency. Others, like the United States, also not having modified the norm for the geometric planning of the road, have started important studies in order to gain an effective model for the verification of the alignment consistency, based on the real speeds practiced from the drivers. In this paper, preliminarily, it has been introduced the methodologies adopted in some countries for the verification of the consistency of a alignment. A new procedure of consistency is proposed, it is based on the model of forecast (MOST) of the operating speeds realized by University of Trieste inside of the project IASPIS for nonbuilt-up highways. This choice is motivated both for the extension of these types of roads in the Italian network, and high accident rates.

It assumed a virtual alignment for one nonbuilt-up road of type C, based on the new proposed Italian standard. The alignment has been then verified with the prescription and the rules of consistency both of the foreign more advanced norms and with the new model proposed here.

## **1. INTRODUZIONE**

Gli studi sull'incidentalità, in relazione alle caratteristiche geometriche degli elementi che costituiscono il tracciato, hanno messo chiaramente in evidenza che una importante causa dell'aumento dell'incidentalità è data non dall'elemento in sé ma dal contesto in cui tale elemento è inserito. Una curva con un piccolo raggio non è pericolosa in quanto tale, ma lo diventa se è preceduta da un tracciato con caratteristiche tali da indurre l'utente a mantenere una velocità eccessiva non compatibile con la sicurezza. Diventa allora importante assicurarsi che la sequenza di elementi lungo il tracciato sia congruente con le aspettative dell'utente, ovvero che un elemento, per essere percorso in sicurezza, non richieda una velocità troppo diversa da quella dell'elemento che lo precede. L'utente infatti imposta la velocità, basandosi sulla propria esperienza, in funzione delle caratteristiche geometriche complessive del tracciato e tende a mantenere tale velocità su un tratto di strada con caratteristiche uniformi [1,2].

L'introduzione di una valida procedura per la verifica di congruenza di un tracciato è un'esigenza largamente avvertita come dimostrano i numerosi studi effettuati ed in corso, e le procedure già adottate da diverse normative. Per effettuare questa verifica, ovvero per valutare la congruenza di un tracciato, è necessario conoscere le reali velocità di percorrenza degli elementi.

In questa nota, preliminarmente, vengono presentate le metodologie adottate in alcuni paesi per la verifica della congruenza di un tracciato. Viene quindi proposta una nuova procedura di congruenza che utilizza, per la previsione delle velocità operative, il modello MOST (Model of Operating Speed - Trieste) sviluppato dall'Unità Operativa dell'Università di Trieste nell'ambito del progetto di ricerca di interesse nazionale IASPIS.

E' stato poi ipotizzato un tracciato per una strada extraurbana di tipo C, secondo la nuova proposta di normativa italiana predisposta su iniziativa del Ministero dei Lavori Pubblici. E' stata infine effettuata un'analisi di confronto del tracciato sia con le prescrizioni e le regole di congruenza delle normative straniere più evolute sia con il nuovo modello qui proposto.

## 2. L'ANALISI DELLA CONGRUENZA NELLE NORMATIVE STRANIERE

### 2.1 La normativa australiana

In seguito ai risultati ottenuti da alcuni studi condotti in Australia [3-4] e diretti ad investigare le relazioni tra la velocità di percorrenza delle curve orizzontali e le loro caratteristiche geometriche è stata pubblicata, nel 1997, l'edizione della normativa attualmente in vigore [5]. Tale normativa prevede un processo iterativo di verifica della compatibilità tra gli elementi geometrici del tracciato.

Il procedimento prevede l'elaborazione di un tracciato di primo tentativo e quindi, in funzione dell'ambiente attraversato e dell'intervallo entro cui sono contenuti i raggi delle curve, l'identificazione della velocità ambientale, ovvero dell'85%ile delle velocità dei veicoli isolati previste sul più lungo rettilineo o curva di maggior raggio. Questa velocità, secondo la normativa australiana, rappresenta la velocità "desiderata" dagli utenti sul tratto di strada in progetto. La velocità ambientale è quindi propria di un tracciato caratterizzato da una geometria omogenea e da una situazione ambientale uniforme. Se uno o entrambi i parametri di valutazione cambiano, la strada deve essere suddivisa in tronchi omogenei con una propria velocità ambientale. Se questa velocità non è raggiunta, almeno in un punto del tracciato, significa che il tracciato non è adatto all'ambiente circostante. Quando la velocità ambientale è congruente con l'ambiente attraversato, è possibile ricavare, attraverso il diagramma di figura 1, la velocità di progetto delle singole curve, pari all'85 %-ile delle velocità reali, in funzione della velocità ambientale e del raggio di curvatura. Con la velocità di progetto si imposta la verifica di stabilità del veicolo in curva assegnate l'aderenza e la pendenza trasversale.

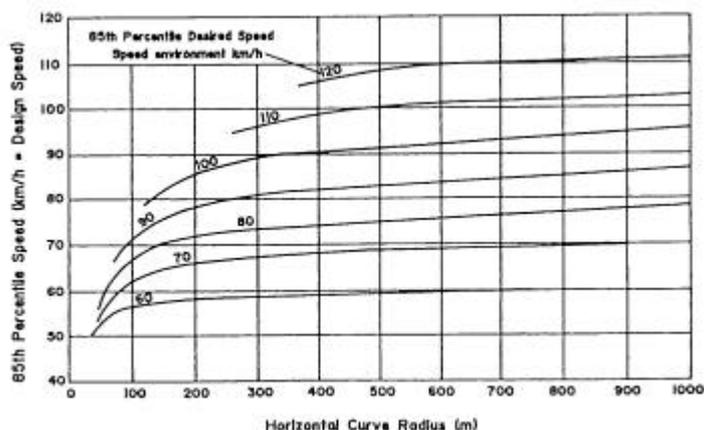


Figura 1-Normativa australiana, determinazione della velocità di progetto.

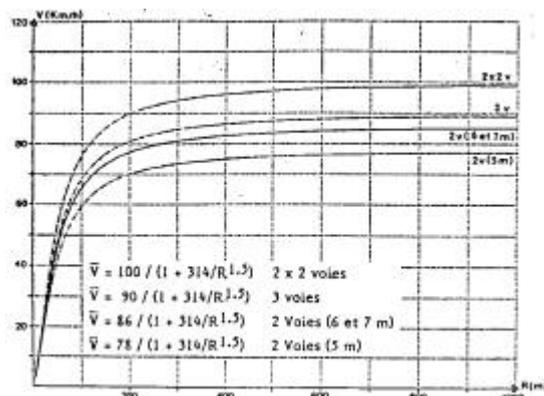
La normativa australiana impone, tra due elementi che si susseguono lungo il tracciato, una differenza massima tra le velocità di progetto pari a 10 km/h. Nel caso che tale limite non venga rispettato il tracciato deve essere modificato ed il procedimento di verifica ripetuto.

### 2.2. La normativa francese

La normativa attualmente in vigore in Francia è stata pubblicata nel 1994 ed ha sostituito la precedente edizione del 1970 [6], rispetto alla quale presenta una impostazione completamente nuova. L'aggiornamento si è reso necessario per adeguare la normativa ai più recenti risultati delle ricerche nel campo dell'interazione tra le

caratteristiche dell'infrastruttura e la sicurezza della circolazione, riassunti in un documento pubblicato nel 1992 [7]. Sulla base di questi risultati sono state individuate delle raccomandazioni completamente nuove tra le quali le regole, per la verifica di compatibilità, sulla sequenza degli elementi geometrici e quella per verificare le distanze di visibilità per le quali viene introdotto il concetto di velocità operativa. Tali regole [8] sono molto semplici e sostanzialmente si riducono a delle relazioni tra la lunghezza dei rettifili ed i raggi delle curve poste alla loro estremità, ed alla relazione  $0,67 \leq R_1/R_2 \leq 1,5$  tra i raggi di due curve che si susseguono lungo il tracciato, che deve essere rispettata qualunque sia la distanza che le separa, ad eccezione del caso in cui entrambi i raggi abbiano più di 500 m.

Come è stato detto la velocità operativa  $V_{85}$  è stata introdotta nella normativa ma non è usata per verificare la congruenza del tracciato, riservando il suo utilizzo alla verifica delle distanze di visibilità. Sulla base dei risultati di uno studio condotto in Francia [9], è possibile calcolare la  $V_{85}$  in funzione del raggio di curvatura, della pendenza longitudinale e della sezione trasversale. In figura 2 è presentato il diagramma che in funzione del raggio di curvatura e della sezione trasversale della strada permette di ricavare la velocità operativa  $V_{85}$ .



**Figura 2-Normativa francese, determinazione della velocità operativa.**

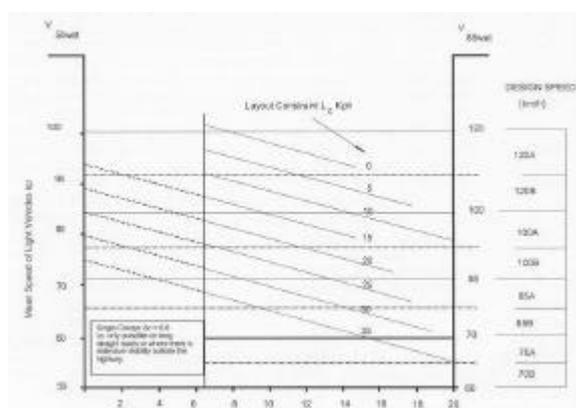
La velocità  $V_{85}$  interviene in due sole raccomandazioni. La prima fissa la minima lunghezza che deve avere un rettilineo interposto tra due curve nello stesso senso, pari alla distanza  $L$  percorsa in 3 secondi alla  $V_{85}$  della curva di raggio maggiore tra le due. La seconda richiede una distanza di visibilità all'ingresso della curva, calcolata dall'inizio dell'arco di cerchio, pari alla distanza percorsa in 3 secondi alla  $V_{85}$  praticata a monte della curva stessa, per permettere all'utente una corretta percezione della curva stessa e spazi adeguati per adattare la traiettoria e la velocità.

### 2.3. La normativa inglese

L'attuale normativa inglese TD 9/93 è un semplice aggiornamento della precedente ed innovativa TD 9/81, basata sui risultati di vari studi condotti in Gran Bretagna alla fine degli anni 70, relativi alla sicurezza stradale e alle relazioni con velocità, traffico e geometria del tracciato.

La normativa TD 9/81 ha introdotto l'utilizzo della velocità operativa  $V_{85}$  come velocità di progetto, per poter garantire la congruenza tra il tracciato con le aspettative dell'utente. Il modello, fornito per calcolare la velocità di progetto in funzione delle caratteristiche della strada, deriva dai risultati di una serie di studi [10] che hanno

identificato gli elementi da cui dipende la velocità operativa media  $V_{50}$  e quindi la  $V_{85}$ , pari a  $1.19 \cdot V_{50}$ . In particolare la velocità operativa in curva è risultata essere funzione delle caratteristiche del tracciato cui la curva appartiene, perché queste inducono l'utente ad impostare una certa velocità, che tende poi a mantenere costante lungo la strada, riducendola solo di poco in entrata di curva. Basandosi su tale principio sono state elaborate delle relazioni che poi sono state razionalizzate e semplificate da due studi [11] successivi per ottenere la procedura proposta nella normativa, che permette di calcolare la velocità di progetto di tratti di strada con caratteristiche uniformi e della lunghezza minima di 2 km. La velocità di progetto dipende da due costanti, caratteristiche del tratto di strada analizzato: la costante  $A_c$ , che è funzione della curvatura media e della distanza di visibilità disponibile e la costante  $L_c$  che è funzione della sezione trasversale della strada e del numero di intersezioni e accessi commerciali presenti su di essa. In base a queste due costanti è possibile dal grafico di figura 3 ottenere la velocità di progetto e quindi la classe di appartenenza della strada.



**Figura 3-normativa inglese, velocità di progetto e classi di appartenenza.**

Il processo iterativo di progettazione prevede il calcolo della velocità di progetto del tracciato di primo tentativo. Le caratteristiche di tutti gli elementi (raggi delle curve orizzontali, raggi dei raccordi verticali, distanze di visibilità) che costituiscono il tracciato vanno quindi confrontati con i valori limite fissati dalla normativa per la classe corrispondente alla velocità di progetto. Se la verifica non è soddisfatta il tracciato viene modificato e nuovamente esaminato. La normativa prevede la possibilità di scendere sotto i valori limite usuali, utilizzando quelli di una delle classi inferiori. Nel caso venga proposta questa soluzione la normativa si limita a richiedere al progettista un confronto con una soluzione che utilizzi i valori minimi desiderabili, specificando le ragioni della scelta.

Il minimo raggio di curvatura che la normativa consente di utilizzare in condizioni normali è il “Desiderable Minimum R”, elencato in tabella 1 in funzione della velocità di progetto. Nel caso di un tracciato caratterizzato da una velocità di progetto 100A, il raggio desiderabile è pari a 720 m, tuttavia la sottoclasse A permette di scendere di tre classi per il raggio di curvatura orizzontale, il che equivale a dire che è possibile utilizzare il raggio desiderabile che corrisponde alla velocità di progetto di 60 km/h, pari a 255 m.

In situazioni di particolare difficoltà, non risolvibili nel modo descritto, è possibile scendere ancora con i valori minimi, nel qual caso però la normativa richiede espressamente l'approvazione preventiva da parte dell'ente preposto alla valutazione del

progetto.

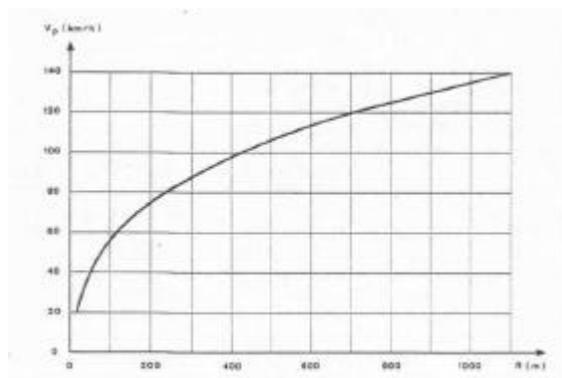
Design Speed [km/h]	120	100	85	70	60	50
Minimum R without elimination of Adverse Camber	2880	2040	1440	1020	720	510
Minimum R with Superelevation of 2.5%	2040	1440	1020	720	510	360
Minimum R with Superelevation of 3.5%	1440	1020	720	510	360	255
Desiderable Minimum R with Superelevation of 5%	1020	720	510	360	255	180
Absolute Minimum R with Superelevation of 7%	720	510	360	255	180	127
Limiting Radius R Superelevation of 7% at sites of special difficulty	510	360	255	180	127	90

**Tabella 1-Normativa inglese, raggi di curvatura in funzione della velocità di progetto**

Con il procedimento descritto la normativa inglese punta a far coincidere la velocità di progetto del tracciato con la velocità alla quale verrà realmente percorso. Non sono previste relazioni tra i singoli tronchi che si susseguono lungo di essa. Questa mancanza può essere critica solo nelle zone di passaggio tra tronchi con caratteristiche diverse e quindi con diverse velocità di progetto. In questo caso la normativa si limita a precisare quanto segue: la zona di transizione non deve presentare brusche variazioni nelle caratteristiche di progetto, ed il tratto di strada con la velocità di progetto più bassa non deve presentare caratteristiche con valori inferiori a quelle desiderabili.

#### 2.4. La normativa svizzera

La relazione tra il raggio di curvatura e la velocità di progetto adottata dall'attuale normativa associa ai valori della velocità di progetto compresi tra 40 km/h e 120 km/h, il raggio di curvatura corrispondente. Questa relazione, riportata in figura 4, è stata ottenuta da misure delle reali velocità dei veicoli e nonostante altri rilievi più recenti abbiano evidenziato che le velocità di percorrenza delle curve sono notevolmente aumentate, in particolare di quelle caratterizzate da piccoli raggi di curvatura, non è mai stata aggiornata.



**Figura 4-Normativa svizzera, velocità rilevata in funzione del raggio di curvatura.**

Per far sì che il guidatore percepisca correttamente l'elemento curvilineo la normativa svizzera fissa la minima lunghezza che deve avere l'arco di cerchio in funzione della velocità di progetto. Questa lunghezza corrisponde ad un tempo di percorrenza e ad un angolo di deviazione elevati, che variano da 2,25 secondi e 31,85° per l'arco percorso a 25 km/h, a 6,90 secondi e 20,27° per l'arco percorso a 120 km/h.

La normativa svizzera prevede la costruzione del diagramma di velocità per

assicurare la congruenza delle sole strade extraurbane, quando il limite di velocità è superiore a 50 km/h. Il limite inferiore della velocità di progetto è rappresentato dalla velocità di base che deve essere scelta in un intervallo che dipende dal tipo di strada. Il limite superiore corrisponde al limite di velocità imposto sulla strada, anche se la velocità di progetto di alcuni elementi è superiore ad esso. La decelerazione e l'accelerazione sono costanti, entrambe pari a  $0,8 \text{ m/s}^2$ , e con tali valori deve essere calcolata la distanza di transizione tra due elementi caratterizzati da diverse velocità di progetto. Questa distanza di transizione deve essere sempre inferiore alla distanza di visibilità disponibile tra i due elementi, che a sua volta deve essere sempre inferiore alla distanza di percezione, fissata dalla normativa pari alla distanza percorsa in 12 secondi alla velocità di progetto. La differenza ammessa tra le velocità di progetto di due curve che si susseguono lungo il tracciato dipende dal tipo di strada. Questa differenza per le strade ad unica carreggiata a due corsie è pari a 20 km/h, anche se è preferibile limitarla a 10 km/h. Nel caso la transizione riguardi una curva caratterizzata da una velocità di progetto inferiore a 80 km/h, con un rettilineo o una curva di raggio superiore a 420 m, tale differenza va limitata a 5 km/h.

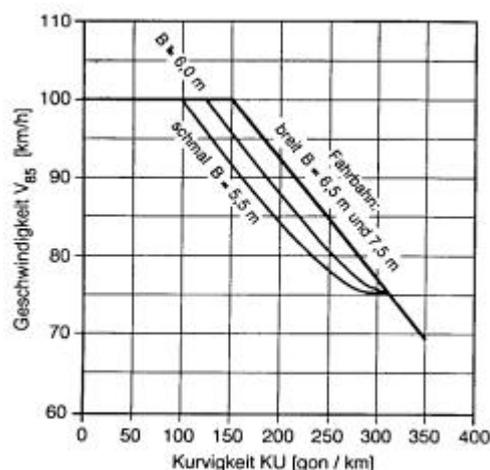
## **2.5. La normativa tedesca**

Alla fine degli anni settanta e nei primi anni ottanta in Germania vennero condotti degli studi [12-13-14] volti ad investigare le relazioni tra le caratteristiche geometriche del tracciato stradale e la reale velocità su di esso tenuta dagli utenti. I risultati di questi studi portarono all'introduzione, nella normativa del 1984, della velocità operativa ed al suo utilizzo per le verifiche della congruenza del tracciato. La normativa attuale, pubblicata nel 1995 riprende in modo sostanzialmente immutato l'impostazione dell'edizione precedente, anche se uno studio [15] successivo ha aggiornato i risultati degli studi precedenti. La velocità di progetto, funzione della categoria di strada, è utilizzata per fissare i valori minimi degli elementi geometrici su un tratto di strada. La velocità di progetto deve rimanere costante a meno che non intervengano evidenti variazioni ad esempio nell'ambiente attraversato o nella sua destinazione d'uso. La velocità operativa è invece riservata per dimensionare la pendenza trasversale in curva e la distanza di visibilità, nonché per assicurare la congruenza del tracciato.

Poiché i risultati degli studi misero in evidenza che, sulle strade extraurbane ad unica carreggiata a due corsie, la velocità operativa rimaneva relativamente costante lungo tratti con caratteristiche geometriche simili, e che essa è fortemente correlata alla loro tortuosità, nella normativa è stata adottata una procedura che prevede, per questo tipo di strade, di valutare la velocità operativa su tratti che presentano caratteristiche uniformi. La normativa tuttavia non fornisce criteri oggettivi per dividere il tracciato di progetto in tratti con caratteristiche uniformi, lasciando al progettista il compito della scelta. Ottenuta la tortuosità media sui vari tratti in cui è stato diviso il tracciato, è possibile valutare su ognuno di essi la velocità operativa utilizzando il diagramma di figura 5, che in caso di necessità può essere utilizzato anche per una singola curva.

Per le strade extraurbane a due o più corsie per senso di marcia non venne invece trovata una relazione soddisfacente tra la velocità operativa e la tortuosità a causa del andamento planimetrico di questo tipo di strade, generalmente molto generoso. I pochi studi [16] esistenti indicarono una diminuzione molto lieve della  $V_{85}$  con il crescere della curvatura. Venne quindi adottato [17] un sistema empirico per il calcolo della velocità operativa  $V_{85}$  che, per velocità di progetto  $V_P$  minori o uguali a 100 km/h si assume pari a  $V_P+20$  Km/h, e per  $V_P$  maggiori di 100 km/h, si assume pari a  $V_P+10$

Km/h. Per assicurare la congruenza del tracciato le velocità operative di due tratti successivi non devono differire per più di 10 km/h. Nella normativa del 1984 era anche richiesto che la differenza tra la velocità operativa e la velocità di progetto non superasse i 20 km/h; questo controllo è stato eliminato nell'edizione attuale, pur mantenendo la raccomandazione generica che le due velocità devono mantenere un rapporto ammissibile, motivando la scelta con la difficoltà nel trovare una relazione oggettiva tra la  $V_{85}$  relativa ad un tratto di tracciato e la sua  $V_P$ .



**Figura 5-Normativa tedesca, velocità operativa in funzione della curvatura media**

## 2.6. Il modello proposto per il programma IHSDM.

La FHWA nei primi anni 90 ha avviato un progetto, non ancora concluso, per lo sviluppo del programma denominato IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) che comprenderà vari moduli, ognuno dei quali permetterà l'analisi del tracciato di progetto in uno specifico settore della sicurezza. Uno di questi moduli servirà alla valutazione della congruenza delle strade ad unica carreggiata a doppio senso di marcia. La metodologia che è stata ritenuta più adatta ad effettuare tale valutazione è la stima della velocità operativa lungo il tracciato, ovvero la costruzione del diagramma di velocità, e la sua successiva analisi. Una prima parte della ricerca è stata pubblicata [18] nel 1994 mentre i risultati definitivi sono stati pubblicati [19] nel 2000. Il modello per la valutazione della velocità operativa considera non solo l'andamento planimetrico del tracciato, utilizzando quale variabile indipendente nelle relazioni sviluppate il solo raggio di curvatura, ma anche l'andamento altimetrico con la pendenza longitudinale, il raggio dei raccordi verticali e la distanza di visibilità disponibile. Inoltre è stato introdotto il concetto di "velocità desiderata", definita come la velocità che l'utente raggiunge in rettilineo quando non limitato dalle condizioni geometriche e di traffico e fissata per le strade ad unica carreggiata a doppio senso di marcia pari a 100 km/h.

La procedura per la costruzione del diagramma prevede il confronto della distanza disponibile tra due curve successive con la lunghezza necessaria ad accelerare dalla velocità calcolata sulla prima curva alla "velocità desiderata" e quindi per decelerare da questa alla velocità della seconda curva. Se la distanza disponibile è superiore allora la "velocità desiderata" è raggiunta e mantenuta, in caso contrario l'andamento è diverso a seconda che la velocità della prima curva sia superiore od inferiore a quella della seconda curva: se la velocità della prima è inferiore a quella della seconda allora il modello prevede che l'utente acceleri in uscita di curva e quindi decelererà per entrare

nella curva successiva; se la velocità della prima curva è superiore a quella della seconda, il modello prevede una variazione lineare tra le due, senza la possibilità di raggiungere valori di velocità superiori a quello della seconda.

I valori proposti per la decelerazione e l'accelerazione sono funzione del raggio di curvatura e delle caratteristiche del profilo longitudinale.

Una volta determinato il diagramma delle velocità, il modello valuta la congruenza in funzione dei valori di accelerazione e decelerazione e della differenza di velocità tra gli elementi che si susseguono lungo il tracciato.

## 2.7. La nuova normativa italiana in corso di emanazione

La nuova normativa italiana prevede la costruzione di un diagramma delle velocità di progetto che si basa sulle seguenti ipotesi: in rettilineo e sulle curve con raggio elevato la velocità tende al limite superiore dell'intervallo relativo al tipo di strada considerato; le variazioni di velocità lungo il tracciato sono consentite nei rettilinei, nelle curve di transizione e nelle curve di ampio raggio con un valore di accelerazione e decelerazione di  $0,8 \text{ m/s}^2$ ; la velocità nelle curve è funzione del raggio di curvatura inoltre si assume che le pendenze longitudinali non influenzino le velocità.

La verifica di congruenza viene eseguita valutando le differenze di velocità di progetto di due elementi contigui. Nei tratti caratterizzati dalla velocità di progetto massima questa differenza deve risultare inferiore a 10 e 5 km/h rispettivamente per strade con  $V_{pmax}$  superiori a 100 km/h e inferiori a 80 km/h; negli altri tratti caratterizzati da velocità inferiori la differenza di velocità di progetto tra due elementi successivi non deve mai superare i 20 km/h.

## 2.8. Nuova procedura basata sul modello MOST sviluppato dall'Università degli studi di Trieste

La procedura qui riportata è un'evoluzione di quella proposta dall'Università di Trieste nel rapporto conclusivo del progetto di ricerca IASPIS [20]. Si ritiene, tuttavia, che tale procedura possa subire delle modifiche, in quanto la campagna di rilievi è tuttora in atto al fine di ampliare i dati a disposizione, sia per quanto riguarda il campione delle velocità rilevate, che il numero e le caratteristiche dei siti su cui le velocità sono raccolte.

La procedura utilizza la differenza tra le velocità operative, come parametro per valutare la congruenza di due elementi geometrici che si succedono lungo il tracciato. I limiti entro i quali deve ricadere tale differenza per poter giudicare il livello della congruenza (buona:  $V_{85} - V_{85+1} \leq 10 \text{ km/h}$ ; tollerabile:  $10 \text{ km/h} < V_{85} - V_{85+1} < 20 \text{ km/h}$ ; inadeguata:  $V_{85} - V_{85+1} \geq 20 \text{ km/h}$ ) sono gli stessi già individuati da Lamm [21]. Le relazioni utilizzate per valutare la velocità operativa sono:

$$\text{per le curve} \quad V_{85} = 95/(1+450/R^{1.5}) \quad (1)$$

$$\text{per i rettilinei indipendenti (comprese le clotoidi):} \quad V_{85} = -16.9+25.07*\text{Log}(L)+0.59*V_{85ep} \quad (2)$$

$$\text{per i rettilinei dipendenti (comprese le clotoidi):} \quad V_{85} = 34.4+0.032*(L)+0.56*V_{85ep} \quad (3)$$

Dove:  $V_{85}$  rappresenta la velocità operativa sulla curva considerate,  $R$  raggio della curva

considerata,  $L$  lunghezza del rettilineo,  $V_{85cp}$  velocità operativa della curva precedente. Le ipotesi sulle quali si basa il modello sono le seguenti:

- La velocità è costante lungo tutto lo sviluppo dell'arco di cerchio e si determina con l'equazione (1).
- I valori dell'accelerazione e della decelerazione restano determinati in  $0,85 \text{ m/s}^2$ . L'accelerazione inizia al termine dell'arco di cerchio, la decelerazione termina all'inizio dell'arco di cerchio.
- Sui rettili (comprese le curve di transizione) la  $V_{85}$  è stimata con le relazioni (2) e (3); se tale velocità risulta inferiore ad una o entrambe le velocità previste sulle due curve poste alle estremità del rettilo, si pone come velocità caratteristica del rettilo la velocità più alta tra quelle delle due curve.
- Il tracciato deve essere esaminato in entrambi i sensi di marcia poiché nelle relazioni (2) e (3) è utilizzata la  $V_{85cp}$ .

### 3. L'ANALISI DEL TRACCIATO DI CONFRONTO

Per confrontare le procedure illustrate in precedenza è stato studiato un opportuno tracciato planimetrico (fig. 6). Per tale motivo sono stati evitati i lunghi rettili, poiché tutte le normative prevedono regole più o meno severe per le curve che li seguono, e i raccordi di continuità, poiché vietati da alcune delle normative esaminate. Lo stesso tracciato è stato anche valutato secondo il modello MOST proposto dall'Università di Trieste.

Il tracciato, presentato in tabella 2, è stato dimensionato secondo le Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione di Strade. La categoria di strada scelta è una extraurbana secondaria C1, con un intervallo della velocità di progetto pari a 60-100 km/h, composta da due corsie da 3,75 m, affiancate in destra da una banchina di 1,50 m. La scelta di una strada extraurbana a singola carreggiata a due corsie è stata fatta poiché questa tipologia presenta una maggiore incidentalità rispetto alle strade a carreggiate separate. Il diagramma di velocità è presentato in figura 7 e le differenze di velocità rispettano i limiti fissati dalla normativa sebbene in cinque casi sia rispettato solo il limite assoluto (20 km/h) e non quello consigliato (15 km/h).

#### 3.1. Normativa australiana

Per poter seguire il percorso progettuale della normativa australiana è necessario preliminarmente stabilire la velocità ambientale propria della strada, di cui il tracciato in esame è una parte. Supponendo che il territorio sia collinare e che l'intervallo dei raggi di curvatura del tracciato può essere fatto ricadere nell'intervallo 150-500 m, dalla normativa si ricava una velocità ambientale di 100 km/h. Innanzi tutto va verificato che sulla strada sia effettivamente possibile raggiungere tale velocità, ovvero, che sia presente un rettilo o una curva di grandissimo raggio. Si suppone quindi che tale elemento sia presente al di fuori del tratto considerato. Dalla figura 1 si può ricavare la velocità di progetto e quindi verificare che nessun raggio sia inferiore a quello minimo previsto per tale velocità. Passando alla verifica di sicurezza sulla curva 5 la velocità di progetto risulta pari a 78,7 km/h a cui corrisponde, per una sopraelevazione dell'8% ed un coefficiente di aderenza trasversale pari a 0,26, un raggio minimo di 143 m, superiore a quello previsto di 120 m. La curva deve essere modificata per poter accettare il tracciato. Il tracciato verifica invece la congruenza poiché si può osservare dalla tabella 3 che nessuna differenza tra le velocità di progetto di due curve che si

susseguono supera i 10 km/h.

curva	elemento	progr. inizio	Lungh. L	raggio R	Clot. A	angolo cerch.	angolo clot.
V1	clotoide	0,00	87,50		175		7,96
	cerchio	87,50	90,00	-350,0		8,19	
	clotoide	177,50	87,50		175		7,96
V2	clotoide	265,00	95,62		198		7,42
	cerchio	360,62	100,00	410,0		7,76	
	clotoide	460,62	95,62		198		7,42
V3	clotoide	556,24	75,38		140		9,23
	cerchio	631,62	60,00	-260,0		7,35	
	clotoide	691,62	75,38		140		9,23
V4	clotoide	767,01	84,71		120		15,86
	cerchio	851,71	100,00	170,0		18,72	
	clotoide	951,71	84,71		120		15,86
V5	clotoide	1036,42	83,33		100		22,11
	cerchio	1119,75	150,00	-120,0		39,79	
	clotoide	1269,75	83,33		100		22,11
V6	clotoide	1353,09	62,50		100		12,43
	cerchio	1415,59	120,00	160,0		23,87	
	clotoide	1535,59	62,50		100		12,43
	rettifilo	1598,09	110,00				
V7	clotoide	1708,09	66,30		118		10,05
	cerchio	1774,39	53,00	210,0		8,03	
	clotoide	1827,39	66,30		118		10,05
V8	clotoide	1893,70	100,66		185		9,42
	cerchio	1994,36	70,00	-340,0		6,55	
	clotoide	2064,36	100,66		185		9,42
V9	clotoide	2165,02	96,00		240		5,09
	cerchio	2261,02	90,00	600,0		4,77	
	clotoide	2351,02	96,00		240		5,09
V10	clotoide	2447,02	88,20		210		5,62
	cerchio	2535,22	70,00	-500,0		4,46	
	clotoide	2605,22	88,20		210		5,62

Tabella 2-Elementi planimetrici del tracciato

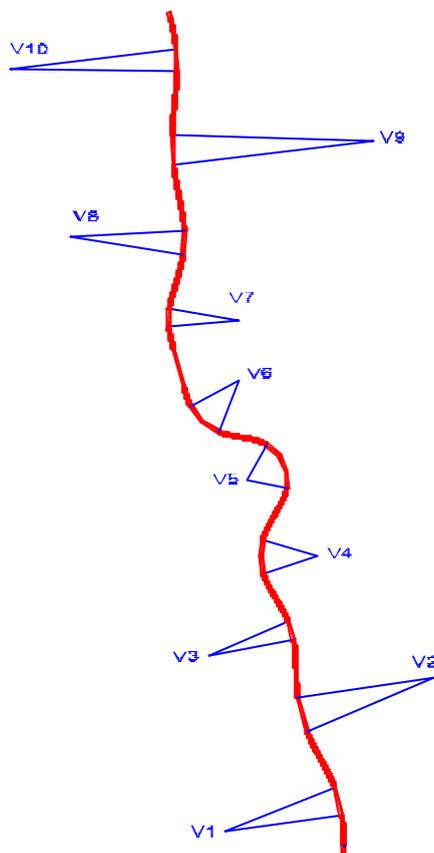


Figura 6-Tracciato virtuale

### 3.2. Normativa francese

Applicando la normativa francese, per poter utilizzare un raggio minimo da 120 m è necessario utilizzare la categoria di strada R60.

L'esame della congruenza del tracciato è molto semplice poiché, in questo caso, basta accertarsi che il rapporto tra i raggi di due curve che si susseguono lungo il tracciato ricada all'interno dell'intervallo  $0,67 \leq R_1/R_2 \leq 1,5$ . Questo non accade in ben quattro casi, tra la curva 2 e la 3, tra la 3 e la 4, ed infine tra la 7 e la 8. Il tracciato quindi per la normativa francese non è accettabile e deve essere modificato.

### 3.3. Normativa inglese

La lunghezza del tracciato in esame è superiore a 2 km quindi è possibile applicare la procedura prevista dalla normativa inglese. La categoria di strada che presenta la sezione trasversale più simile alla categoria italiana C1 è la S2, con carreggiata da 7,30

m e larghezza degli elementi marginali (arginello e banchina) pari a 3,50 m. Si suppone che il numero di intersezioni ed accessi commerciali sulla strada sia compreso tra 6 e 8.

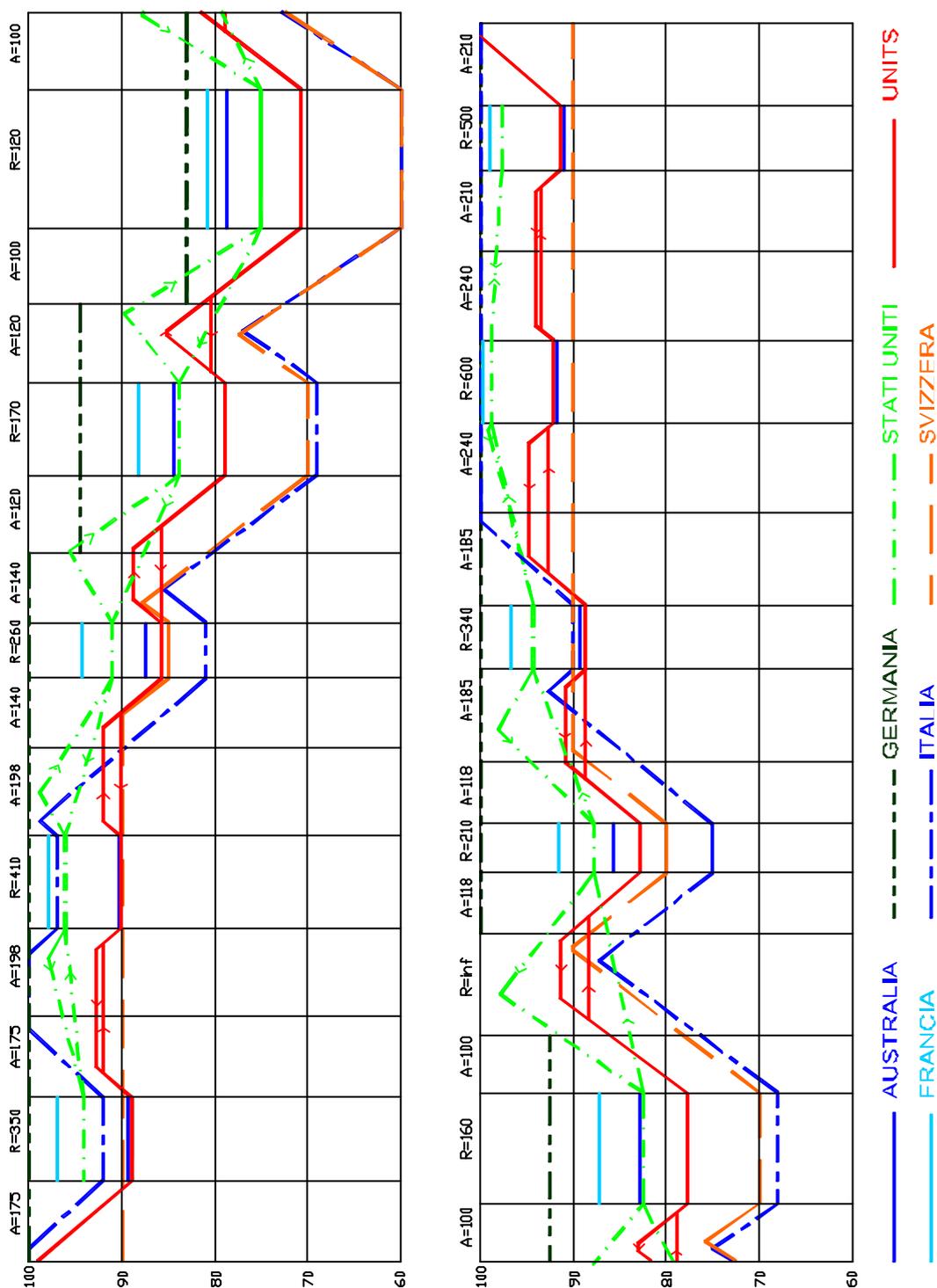


Figura 7-Diagramma delle velocità per i diversi modelli.

Con tali dati è possibile ricavare dall'apposita tabella il valore della costante  $L_c$ , pari a 23. Il valore della costante  $A_c$  è invece pari a 14.40, calcolato in funzione della

tortuosità media del tracciato, pari a  $126,19^\circ/\text{km}$ , e della visibilità armonica media, pari a 192.54 m. Con il valore delle due costanti dal diagramma di figura 4 si ottiene una classe della velocità di progetto pari a 100B, corrispondente ad una velocità operativa sul bagnato di 85 km/h. Secondo gli studi dai quali deriva la procedura questa è la velocità che l'utente ritiene appropriata per questo specifico tracciato. La velocità di progetto di 100 km/h dalla tabella 1 ha un raggio desiderabile pari a 720 m; la sottoclasse B consente di poter scendere di quattro classi di velocità ed utilizzare quindi il raggio desiderabile alla velocità di 50 km/h, corrispondente a 180 m. Nessuna delle curve del tracciato rispetta il minimo desiderabile e tre di esse nemmeno il limite assoluto, per cui il progettista dovrebbe motivare la scelta di tutti i raggi adottati e per tre di essi sarebbe necessario chiedere l'approvazione preventiva da parte dell'ente preposto alla valutazione del progetto. La conclusione è che, in condizioni normali, il tracciato in esame non è valido per la normativa inglese, anche se in linea teorica potrebbe essere accettato se particolari ed ineliminabili vincoli esterni rendessero impossibile un suo miglioramento.

### **3.4. Normativa svizzera**

Le nuove "Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione di Strade" del CNR traggono parecchi elementi dalla normativa svizzera, tra cui il diagramma di velocità, per cui è logico attendersi una somiglianza nella valutazione del tracciato in esame, come in effetti avviene. Esistono tuttavia alcune non trascurabili differenze. Innanzitutto sette delle dieci curve che compongono il tracciato di prova hanno una lunghezza inferiore alla minima richiesta dalla normativa svizzera. Queste lunghezze minime sono considerevoli e possono rendere difficile l'inserimento del tracciato nell'ambiente, d'altro canto permettono di avvicinare maggiormente la reale velocità alla velocità di progetto delle curve di raggio medio-piccolo poiché, come rilevato da vari studi, maggiore è la lunghezza di queste curve minore è la loro velocità di percorrenza. Questa relazione sembra essere anche confermata dalle analisi condotte finora all'Università di Trieste.

Il diagramma delle velocità presenta alcune significative differenze rispetto quello italiano, come si può vedere dalla figura 7. La differenza più importante è che il limite superiore è dato dal limite di velocità previsto sulla strada e non dalla massima velocità di progetto. Questa differenza permette una maggiore flessibilità progettuale poiché, anche dopo rettili o curve di raggio elevato, su cui è possibile limitare la velocità massima raggiunta nel diagramma, è possibile fare seguire elementi caratterizzati da velocità di progetto che non possono invece essere utilizzati per la normativa italiana. Non va dimenticato tuttavia che recenti studi hanno dimostrato che i limiti di velocità non sono rispettati. La seconda differenza dipende dal fatto che la normativa svizzera prevede solo valori della velocità di progetto multipli di 5 km/h. Di conseguenza il diagramma di velocità è sempre superiore, o al limite uguale, a quello italiano e la differenza ovviamente può raggiungere i 4 km/h, se si arrotondano le velocità all'unità. Questa differenza si può osservare in figura 7 per la curva 3, sulla quale la velocità di progetto italiana è pari a 81 km/h mentre quella svizzera è pari a 85 km/h.

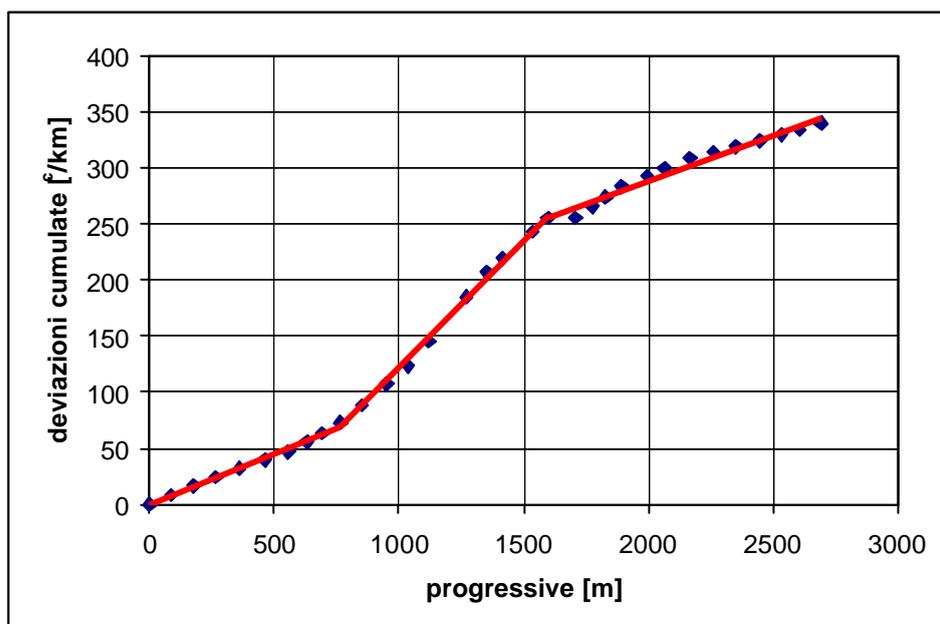
### **3.5. Normativa tedesca**

La velocità di progetto del tracciato in esame è pari a 60 km/h, costante lungo tutto il tracciato poiché non intervengono variazioni evidenti nell'ambiente attraversato che possano giustificare una sua variazione. L'analisi dei raggi di curvatura che si

susseguono lungo il tracciato rivela che tutti i loro rapporti ricadono nell'intervallo ammissibile. Questo intervallo è rappresentato nella normativa tedesca dallo stesso diagramma che è stato adottato anche dalla normativa italiana, ma a differenza di quest'ultima, deve essere utilizzato anche quando tra le due curve è interposto un rettifilo, come nel caso del rettifilo tra le curve 6 e 7, lungo 110 m.

Per valutare la velocità operativa lungo il tracciato è necessario dividerlo in tratti caratterizzati da una tortuosità media uniforme. Per poter identificare tali tratti, seguendo l'esempio proposto dalla normativa, è stato costruito il diagramma delle deviazioni cumulate in funzione della progressiva. Come si può osservare in figura 8 è possibile identificare facilmente tre tratti in cui dividere il tracciato, caratterizzati da tre diverse pendenze dei segmenti che meglio approssimano l'andamento della deviazione cumulata.

Il primo tratto, che comprende le prime tre curve, è caratterizzato da una tortuosità media pari a  $94,55 \text{ } ^\circ/\text{km}$ , il secondo, che comprende le curve 4, 5 e 6, è caratterizzato da una tortuosità media pari a  $220,42 \text{ } ^\circ/\text{km}$  ed il terzo, che comprende le ultime quattro curve, da una curvatura media pari a  $80,67 \text{ } ^\circ/\text{km}$ . Con questi valori, ed ipotizzando una carreggiata di 7,5 m, è possibile ricavare dal diagramma di figura 5 la velocità operativa sui tre tratti, rispettivamente pari a 100, 88, 100 km/h, che vengono utilizzate per la verifica di congruenza del tracciato, che in questo caso, seppur di poco, non è verificata poiché la differenza tra due tratti successivi, che dovrebbe essere limitata a 10 km/h, è invece pari a 12 km/h. La tabella 3 riporta le velocità operative ricavate dal diagramma di figura 5 per ogni singola curva; con tali velocità devono essere dimensionate le pendenze trasversali e le distanze di visibilità. Nella procedura utilizzata dalla normativa tedesca la lunghezza della curva è determinante per valutare la sua velocità operativa e di conseguenza la congruenza del tracciato, sarebbe bastato infatti che l'arco di cerchio della curva 5 avesse uno sviluppo di 70 m per avere la curvatura media pari a  $215,65 \text{ } ^\circ/\text{km}$ , la velocità operativa pari a 90 km/h e quindi per considerare accettabile il tracciato.



**Figura 8-Deviazione cumulata in funzione della progressiva del tracciato**

### 3.6. Il modello proposto per il programma IHSDM

Per applicare il modello previsto per il programma IHSDM si è ipotizzato che il tracciato sia piano, così da poter escludere l'influenza del profilo longitudinale e limitare l'analisi all'andamento planimetrico. La velocità operativa calcolata sulle curve, presentata in tabella 3, è costante sull'arco di cerchio e può variare lungo gli altri elementi.

In questo tracciato la distanza disponibile tra due curve è sempre insufficiente a raggiungere la velocità desiderata di 100 km/h e quindi l'andamento del diagramma dipende dalle velocità sulle due curve, come è possibile osservare in figura 7 e quindi il tracciato deve essere esaminato in entrambe le direzioni. Questa differenza, così marcata dell'andamento in funzione del senso di marcia, può tuttavia generare delle situazioni poco realistiche, come ad esempio tra le curve 6 e 7: la velocità di percorrenza della curva 6 è pari a 82,5 km/h mentre quella della curva 7 è 87,8 km/h, lo spazio disponibile tra le due è 238,8 m, inferiore ai 350,2 m necessari a raggiungere i 100 km/h; di conseguenza la variazione è lineare tra le velocità caratteristiche delle due curve e ne risulta un valore di accelerazione molto basso, pari a  $0,15 \text{ m/s}^2$ . Nella direzione opposta il comportamento è diverso: in uscita dalla curva 7 la velocità aumenta senza raggiungere la velocità desiderata per poi decelerare fino alla velocità della curva 6. Una simile differenza tra gli andamenti nei due sensi di marcia tra due curve di caratteristiche comparabili è difficilmente spiegabile.

Il modello, per valutare le differenze di velocità tra gli elementi successivi, utilizza le classi di velocità proposte da Lamm (buona:  $V_{85} - V_{85+1} \leq 10 \text{ km/h}$ ; tollerabile:  $10 \text{ km/h} < V_{85} - V_{85+1} < 20 \text{ km/h}$ ; inadeguata:  $V_{85} - V_{85+1} \geq 20 \text{ km/h}$ ). In direzione 1 le sequenze delle curve 3-4 e 4-5, con differenze tra le velocità raggiunte in uscita della prima curva e le velocità sulle curve successive pari a 11,91 km/h e 14,75 km/h ricadono nella classe tollerabile, mentre in direzione 2 le sequenze delle curve 8-7, 7-6 e 6-5 ricadono nella medesima classe, con differenze tra le velocità pari a 10,29 km/h, 15,30 km/h, 12,81 km/h. Il modello proposto dalla FHWA identifica chiaramente nella sequenza di curve di raggio decrescente che portano alla curva 5 l'elemento che non soddisfa pienamente la congruenza del tracciato. Tuttavia il tracciato può essere mantenuto poiché le differenze di velocità ricadono nell'intervallo tollerabile, sebbene sia auspicabile la sua modifica per riportare al di sotto dei 10 km/h le differenze di velocità.

### 3.7. La procedura basata sul modello MOST

La procedura che si basa sul modello sviluppato dall'Università degli Studi di Trieste identifica, come si può osservare dalla figura 7, tre situazioni di congruenza "tollerabile", in cui la differenza tra la velocità operativa di due elementi, valutata nel senso di marcia, è compresa tra 10 km/h e 20 km/h. In particolare, nella direzione 1 la differenza tra la velocità raggiunta tra le curve 4 e 5 e quella della curva 5 è pari a 14,5 km/h, mentre nella direzione 2 la differenza tra le velocità raggiunte prima delle curve 5 e 6 e la loro velocità di percorrenza è pari rispettivamente a 12,2 km/h e 13,6 km/h. Il modello non individua situazioni in cui la congruenza non è accettabile, ovvero nelle quali la differenza delle velocità è superiore a 20 km/h, per cui il tracciato può essere giudicato accettabile, anche se sarebbe preferibile intervenire per eliminare le sequenze "tollerabili".

La velocità operativa è superiore alla velocità di progetto su tutta la parte centrale del tracciato, come si può vedere dalla figura 7, e raggiunge sulla curva 5 la differenza di 11 km/h. In particolare la velocità operativa, calcolata con questa relazione, è superiore a

quella di progetto fino a valori di quest'ultima pari a 87 km/h, corrispondenti ad una curva di raggio di circa 310 m. Oltre tale valore la velocità operativa è inferiore alla velocità di progetto. Le velocità operative alle quali più si avvicinano quelle calcolate con questo modello sono proprio quelle ottenute con la normativa australiana, perlomeno per raggi superiori a 250 m in strade con velocità ambientale di 100 km/h. Le velocità operative calcolate con i modelli francese, tedesco ed inglese sono invece nettamente superiori. Questo però è imputabile alle caratteristiche delle strade sulle quali sono stati ricavati i dati utilizzati per calcolare l'equazione di regressione. Per tale motivo, come è già stato accennato, è in atto una ulteriore campagna di raccolta dei dati su strade di caratteristiche diverse da quelle già utilizzate.

curva	Italia	Svizzera	Australia	Francia	Germania	Germania	U.K.	FHWA	UNIT S
velocità	Vp	Vp	V85	V85	V85 sezioni	V85 curve	V85	V85	V85
V1	92.00	95.00	89.40	96.88	100.00	100.00	100.00	94.61	88.89
V2	97.00	100.00	90.22	97.92	100.00	100.00	100.00	96.10	90.12
V3	81.00	85.00	87.46	94.22	100.00	100.00	100.00	91.07	85.79
V4	69.00	70.00	83.47	88.23	88.00	94.50	100.00	83.79	78.97
V5	60.00	60.00	78.67	80.75	88.00	83.00	100.00	75.03	70.77
V6	68.00	70.00	82.75	87.11	88.50	92.50	100.00	82.48	77.72
V7	75.00	80.00	85.67	91.59	100.00	100.00	100.00	87.80	82.76
V8	90.00	95.00	89.24	96.67	100.00	100.00	100.00	94.31	88.64
V9	100.00	120.00	91.73	99.65	100.00	100.00	100.00	98.86	92.18
V10	100.00	110.00	91.08	98.94	100.00	100.00	100.00	97.67	91.32

**Tabella 3-Velocità sulle curve del tracciato di confronto**

#### **4. CONFRONTO TRA I MODELLI DI CONGRUENZA**

L'analisi delle procedure di compatibilità considerate, e la loro applicazione al tracciato di confronto, ha permesso di fare alcune considerazioni. Innanzitutto è possibile dividere le procedure per valutare la congruenza del tracciato in due gruppi che seguono principi diversi. Del primo gruppo fanno parte la normativa australiana, inglese e tedesca. Queste procedure, pur utilizzando parametri di controllo diversi, hanno in comune il principio generale secondo il quale l'utente "sceglie" una velocità con la quale percorrere un tronco stradale omogeneo per caratteristiche generali del tracciato e tende a discostarsi il meno possibile da questa velocità anche quando affronta una curva. Di conseguenza la reale velocità di percorrenza, V85, di una curva non dipende dalle sue sole caratteristiche geometriche ma anche dal tracciato in cui è inserita. Per la normativa australiana il tracciato esaminato è congruente in termini di successione di curve non è invece garantita la sicurezza, in termini di stabilità, per quanto riguarda la curva 5. Per la normativa inglese il tracciato non risulta congruente; per la normativa tedesca il tracciato risulta non congruente tra i vari tronchi omogenei mentre risulta congruente valutando le caratteristiche dei singoli elementi.

Del secondo gruppo fanno parte le procedure della normativa italiana, di quella svizzera e quelle proposte dalla FHWA e dall'Università degli Studi di Trieste. Tutti quattro questi modelli fanno dipendere la velocità di percorrenza della curva dal solo raggio di curvatura della curva stessa e costruiscono il diagramma di velocità. Pur tuttavia c'è una fondamentale differenza tra i primi due ed i secondi due poiché mentre questi utilizzano la velocità operativa, i primi due utilizzano la velocità di progetto che può essere sensibilmente inferiore alla reale velocità tenuta dai veicoli, soprattutto sulle

curve di piccolo raggio. Inoltre il modello proposto dall'Università degli Studi di Trieste permette di stimare la velocità che l'utente raggiunge accelerando in uscita di curva in funzione della lunghezza del rettilineo e delle curve di transizione più verosimilmente degli altri tre, per i quali la durata dell'accelerazione in uscita di curva è indipendente da questa lunghezza e porta sempre al limite superiore della velocità di progetto. Questa procedura presenta una notevole concordanza nei risultati con il modello della FHWA. Infatti entrambi identificano le stesse sequenze di curve come quelle più pericolose (in dir. 1: 4-5; in dir. 2: 6-5, 7-6) con differenze di velocità anche molto simili (dir. 1: UNITS 14,5 km/h; FHWA 14,7 km/h; dir. 2: UNITS 12,2 km/h, 13,6 km/h; FHWA: 15,3 km/h; 12,8 km/h). Entrambi i modelli ritengono "tollerabile" il tracciato ed identificano nella sequenza di curve (curve 4, 5, 6) l'elemento che non garantisce una buona congruenza e che eventualmente potrebbe essere modificato. Anche la normativa italiana identifica le stesse sequenze del modello della FHWA. Infatti dal diagramma di velocità si osserva che in direzione 1 le sequenze di curve 2-3, 3-4 e 4-5 portano a differenze di velocità di circa 17 km/h mentre in direzione 2 le sequenze di curve 7-6 e 8-7 sono caratterizzate da differenze pari a 19 km/h e 18 km/h. La normativa svizzera invece verifica pienamente il tracciato, in termini di diagramma di velocità, ma considera insufficiente lo sviluppo della maggior parte delle curve.

Infine la normativa francese non è collocabile in nessuno dei due gruppi poiché adotta un sistema di verifica concettualmente diverso, che discende dagli studi sull'incidentalità condotti in Francia. Anch'essa individua nella parte centrale, caratterizzata da curve di caratteristiche nettamente inferiori a quelle che le precedono e le seguono, un elemento di potenziale pericolo, ma non in quanto tale, quanto piuttosto perché inserito in modo inadeguato con il resto del tracciato. La normativa francese quindi non pone l'accento sul fatto che siano presenti curve con caratteristiche inadatte alle velocità raggiunte, quanto sul fatto che esse, per poter essere inserite in sicurezza nel tracciato, devono essere precedute da curve che permettano all'utente di percepire la progressiva variazione della geometria della strada e quindi adeguare per tempo la propria velocità.

## 5. CONCLUSIONI

L'analisi ed il confronto delle normative vigenti e delle altre proposte ha consentito di individuare diverse modalità per valutare e garantire la congruenza. Alcune sono delle procedure iterative, altre si limitano a stabilire delle relazioni tra i raggi delle curve adiacenti unitamente a verifiche delle distanze di visibilità, altre ancora prevedono il controllo del tracciato progettato con la costruzione di un diagramma delle velocità valutando le differenze tra le reali velocità di percorrenza degli elementi che si susseguono lungo la strada.

Non esiste quindi un metodo universalmente accettato per la valutazione della congruenza, anzi viene messo in evidenza come l'adozione, per uno stesso tracciato, di regole diverse, porta a risultati che possono risultare anche contrastanti. Particolari tracciati possono risultare compatibili per alcune procedure, incompatibili per altre, essere compatibili parzialmente per altre ancora.

Tutte le procedure analizzate sono però concordi nel richiedere un criterio di congruenza per la valutazione dei tracciati, per esempio attraverso un diagramma di velocità, e che questa valutazione debba passare attraverso la definizione di una velocità operativa, con la quale effettuare non solo le verifiche di congruenza ma anche quelle di sicurezza.

Per quanto riguarda la nuova normativa italiana in corso di emanazione va inoltre sottolineato come l'ampliamento degli intervalli di velocità di progetto comporta sì maggior flessibilità nella progettazione, ma impone tassativamente, la verifica di congruenza, soprattutto per quei tipi di strade dove i limiti di velocità imposti dal codice risultano elevati e quindi dove la presenza di un elemento poco vincolante, come un lungo rettilineo o una curva di ampio raggio, può rappresentare per l'utente, che si trova successivamente ad impegnare una curva di piccolo raggio, un potenziale pericolo. Per consentire l'inserimento nel tracciato di confronto di una curva di raggio minimo la norma quindi impone la verifica di congruenza che significa in definitiva garantire un lungo tratto di approccio caratterizzato da curvatura decrescente.

Le verifiche previste nella normativa fanno riferimento alla velocità di progetto che, come già evidenziato, per curve di piccolo raggio risulta inferiore a quella operativa prevista invece dalla maggior parte delle procedure per la verifica di congruenza.

La nuova procedura, qui proposta, che si basa sul modello di previsione delle velocità operative MOST, può superare questa limitazione. Si ritiene, tuttavia, che tale procedura possa subire delle modifiche, in quanto la campagna di rilievi è tuttora in atto al fine di ampliare i dati a disposizione, sia per quanto riguarda il campione delle velocità rilevate, che il numero e le caratteristiche dei siti su cui le velocità sono raccolte.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Speed of curves: data report*, McLean J.R. and Chin Lenn R.L., ARRB Interim Report AIR n°200-1A, Australian Road Research Board, 1977.
- [2] *Effects of Road Curvature on Vehicle/driver behaviour*, Report by the Transportation Research Group for the Department of Transport, University of Southampton, 1982.
- [3] *Speed on curves: preliminary data appraisal and analysis*, McLean J.R., ARRB Interim Report AIR n°200-2, Australian Road Research Board, 1978.
- [4] *Speed on curves: regression analysis*, McLean J.R., ARRB Interim Report AIR n°200-3, Australian Road Research Board, 1978.
- [5] *Rural Road Design, Guide to the Geometric Design of Rural Roads*; Austroads, 1997.
- [6] *I.C.T.A.R.N., Instruction sur les Conditions Techniques d'Amenagement des Routes Nationales*; Ministère de l'Équipement et du Logement; 1970.
- [7] *Sécurité des Routes et des Rues*; SETRA Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, CETUR Centre d'Études des Transports Urbains; Bagneux, 1992.
- [8] *Caractéristiques Routières et Sécurité*; Yerpez, J.; Ferrandez, F.; Synthèse INRETS n°2; Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité; Arcueil, 1986.
- [9] *Vitesses pratiquées et Géométrie de la Route*, Gambard J. M., Louah G., SETRA Service d'Études Techniques des Routes et Autoroute, Parigi, 1986.
- [10] *A study of Speed/flow relationships on rural motorways and all purpose dual carriageways (1978), A study of Speed/flow/Geometry relationships on rural single-carriageway road (1980), A study of Speed/flow relationships on hilly rural all-purpose dual carriageways (1978)*, Transport and Road Research Laboratory TRRL, Leaflets LF 779, 780, 923, 924, Reports for the Department of Transport.
- [11] *The relation between route geometry and vehicle speed*, Simpson D., PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick, 1980.

- [12] *Driving Dynamics and Design Characteristics - A contribution for Highway Design under Special Consideration of Operating Speed*, Institute of Highway and Railroad Design and Construction, University of Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1973.
- [13] *Commentary to the Guidelines for the Design of Rural Roads RAL L-1*, German Road and Transportation Research Association, Berlin, Federal Republic of Germany, 1979.
- [14] *Operating Speed and Curvature Change Rate*, Koeppel G., Bock H., Road Construction and Road Traffic Technique, Federal Republic of Germany, Vol. 269, 1979.
- [15] *Überprüfung der Relationstrassierung für Straßen der Kategoriengruppe A*, FA 02. 153 R93E des Bundesministers für Verkehr, Zwischenbericht, Darmstadt, 1995.
- [16] *Relationship between Driving Behaviour and Curvature Change Rate on Multilane Roads*, Kakavoutis J., Institute of Highway and Railroad Design and Construction, University of Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1975.
- [17] *Adjustment of the German Design Guidelines for the Alignment (RAS L-1) to Newer Design Guidelines*, Durth W., Lippold C., Research Contract FE n°6.2.2 191 of Federal Ministry of Transportation, Department of Road Design and Road Operation, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany, 1993.
- [18] *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*; Report FHWA-RD-94-034; 1994.
- [19] *Speed Prediction for two-lane Rural Highways*; Report FHWA-RD-99-171; 2000.
- [20] *Modelli di previsione delle velocità operative*; unità di ricerca dell'Università di Trieste; Rapporto Conclusivo del Progetto di Ricerca IASPIIS: Interazione Ambiente Sicurezza nel Progetto delle Infrastrutture Stradali;
- [21] *Design on two lane rural roads*; R. Lamm, E. M. Choueiri, J. C. Hayward; Transportation Research Record n° 1195, Transportation Research Board, Washington D.C..