

VERIFICA DELLE TRAIETTORIE VEICOLARI IN CORRISPONDENZA DELLE INTERSEZIONI A RASO. PROPOSTE DI ADEGUAMENTO DEI CRITERI DI PROGETTAZIONE

Sascia Canale - Salvatore Leonardi - Giuseppina Pappalardo

1. PREMESSE

Le intersezioni a raso, dal punto di vista della regolamentazione della viabilità possono così essere classificate:

- intersezioni libere (vige soltanto la “precedenza” a destra);
- intersezioni regolate dal segnale di STOP o da quello di dare precedenza;
- intersezioni semaforizzate.

Da un punto di vista prettamente geometrico, invece, la conformazione delle intersezioni a raso risulta dipendente da una serie di parametri, quali:

- importanza delle strade che si intersecano (strade urbane di scorrimento, strade urbane di quartiere, strade locali);
- velocità operativa (generalmente quella dell’85° percentile, nel caso di strade esistenti);
- manovre consentite (attraversamento, svolte a destra e a sinistra);
- entità dei flussi distribuiti sulle diverse manovre;
- tipologie di veicoli (veicoli leggeri, mezzi pesanti, bus, ecc.).

In funzione dei parametri suddetti, si può passare da schemi semplici (Fig. 1) in cui l’incrocio avviene tramite il semplice innesto delle due strade, a schemi notevolmente complessi (Fig. 2) in cui sono presenti sia corsie supplementari (corsie di attesa, corsie di decelerazione, corsie centrali di accumulo) sia elementi di arredo stradale preposti alla canalizzazione dei veicoli (isole divisorie, direzionali e “a goccia”).

In tale contesto, un aspetto degno di approfondimento è quello inerente al tracciamento dei cigli delle corsie di svolte a destra.

Sia la normativa italiana (CNR - Norme sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane – Bollettino ufficiale n° 90/1983) che molte altre Norme internazionali consigliano l’impiego, per le curve di ciglio delle intersezioni a raso, di forme geometriche

che approssimano la sagoma interna dei grandi veicoli che percorrono curve di raggio piccolo e grande angolo di deviazione.

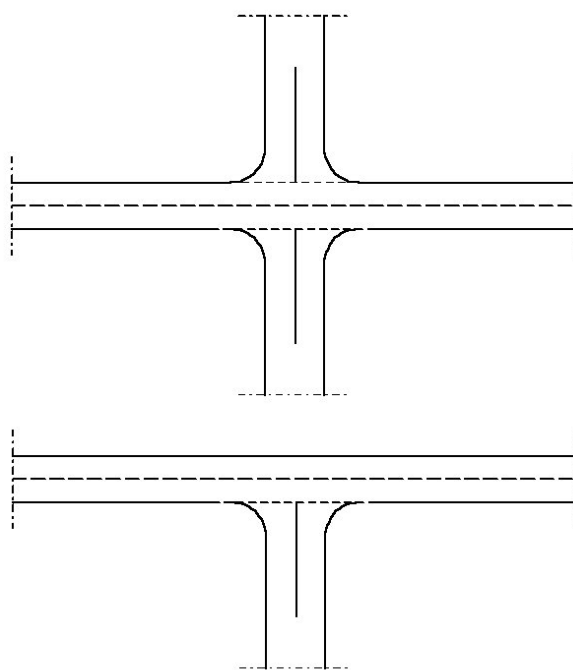


Figura 1 – Schemi semplici di intersezioni a raso.

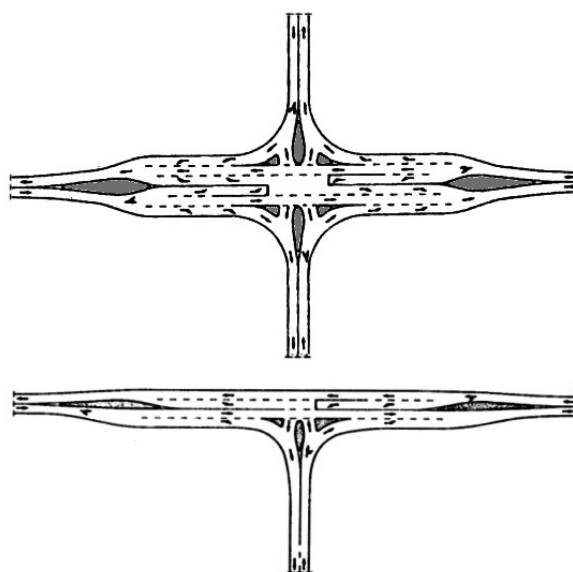


Figura 2 – Schemi complessi di intersezioni a raso.

Nell'ambito del presente studio si vuole, in primo luogo, analizzare i criteri progettuali delle curve di ciglio proposte dalle differenti normative, soffermandoci, in particolare, sulla verifica critica delle modalità di tracciamento consigliate dalla Norma CNR.

Tramite il supporto di un software di simulazione, si studieranno le traiettorie di svolta a destra eseguite dalle diverse tipologie di veicoli che possono interessare la rete viaria urbana.

Gli obiettivi che si intende perseguire sono essenzialmente di due tipi:

- ◆ affinare la metodologia di progetto proposta dalla normativa italiana, soprattutto per quel che concerne il tracciamento delle curve di ciglio associate a diversi valori degli angoli di deviazione (si ricorda, in proposito, che le Norme del CNR riducono tale problematica alla semplicistica proposta di alcuni valori dei raggi di svolta associati a tre possibili angoli di deviazione);
- ◆ definire compiutamente le fasce d'ingombro relative alle differenti situazioni di progetto, anche al fine di individuare gli spazi interni all'intersezione che devono essere lasciati sgombri da ostacoli di varia natura (isole o altri elementi di arredo stradale).

Il presente gruppo di ricerca ritiene che lo studio delle problematiche inerenti alla percorribilità delle intersezioni (sia in ambito urbano che in quello extraurbano) risulti utile anche al fine di migliorare le prestazioni in termini di sicurezza delle intersezioni medesime. È infatti noto che molti incidenti in corrispondenza degli incroci stradali siano causati dalla non corretta conformazione delle zone di svincolo che induce a frequenti errori di valutazione da parte degli utenti (soprattutto in termini di velocità, del mantenimento delle giuste distanze di sicurezza e dell'adeguata percezione visiva dell'area).

L'ottimizzazione delle traiettorie di svolta, in ambito urbano, deve pertanto inquadrarsi anche nell'ottica di garantire agli utenti una transitabilità degli incroci sempre più rispondente alle effettive aspettative, sia in termini di sicurezza che di comfort.

2. LE CURVE DI CIGLIO: NORMATIVE NAZIONALI ED INTERNAZIONALI

Nell'ambito della viabilità urbana è frequente l'utilizzo di raccordi di piccolo raggio (da pochi metri e qualche decina) per la realizzazione delle svolte di innesti a raso.

I bassi valori di velocità a cui attingono i veicoli durante la percorrenza dei raccordi planimetrici di piccolo raggio, consentono di affrontare le problematiche inerenti alla svolta non con criteri dinamici, ma cinematici o geometrici.

Il criterio generalmente adottato è quello del mantenimento, lungo il raccordo, degli stessi franchi laterali in rettilineo rispetto al ciglio ed ai veicoli provenienti in senso contrario.

Per il tracciamento della curva che descrive la traiettoria di percorrenza non ci si riferisce all'asse geometrico del tronco stradale, ma al ciglio dello stesso. La forma di tale curva è ricavata dall'approssimazione della traiettoria interna della sagoma dei grandi veicoli (autotreni ed autotarticolati), che transitano su curve di piccolo raggio ed ampio angolo di deviazione. Questa linea è definita come *curva trattrice* della curva percorsa dalle ruote anteriori del veicolo.

Può darsi la seguente definizione: data una curva Γ , se su tutte le tangenti ad essa si portano dei segmenti di lunghezza L costante, con un estremo nel punto di tangenza, l'altro estremo descriverà una curva E che si dice "base" di Γ , mentre Γ è la "trattrice" di E (Fig. 3).

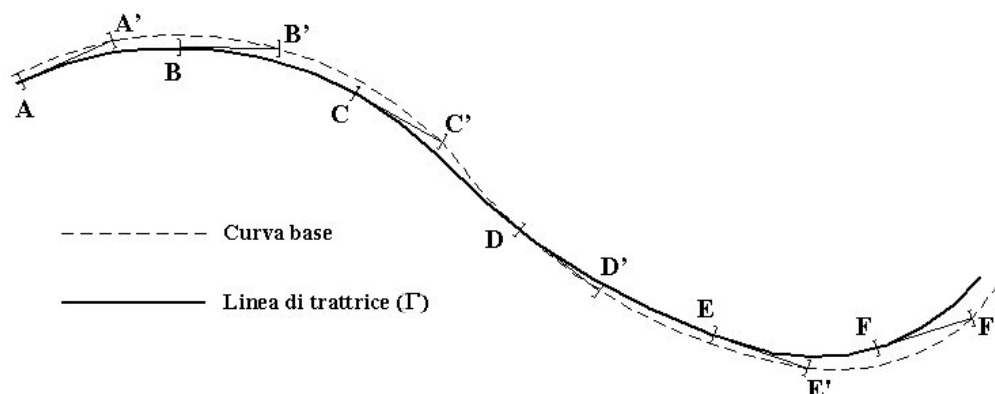


Figura 3 – Rappresentazione schematica della curva base e della relativa linea di trattrice.

La curva trattrice è rappresentata da un'equazione differenziale del primo ordine, le cui soluzioni si possono determinare solo per curve base E di semplice equazione. Nel caso di curve E di equazione più complessa (ad esempio per curve tracciate da veicoli con rimorchio) il problema deve essere affrontato e risolto solo con metodi numerici.

Le normative di diversi paesi hanno approssimato tale curva con una successione di tre archi di circonferenza: due tratti di raccordo (iniziale e finale) ed un tratto centrale condizionante la manovra di svolta.

2.1. Le Norme italiane (C.N.R.)

La normativa italiana (CNR - Norme sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane – Bollettino ufficiale n° 90/1983) prevede l'utilizzo di curve tricentriche, cioè composte da tre archi di circonferenza aventi la stessa tangente nei punti di unione ma raggi e angoli diversi tra di loro. L'impiego di tali curve è consigliato per il tracciamento del margine delle corsie

di svolta a destra nelle intersezioni. Le curve devono rispettare le seguenti condizioni (Fig. 4):

a) per gli angoli:

$$\alpha + \beta + \gamma = \delta \quad [1]$$

$$\alpha = \gamma \quad [2]$$

$$\beta = 5.5 \alpha \quad [3]$$

con δ angolo di deviazione dei cigli

b) per i raggi

$$R_1 : R_2 : R_3 = 2.5 : 1 : 5.5 \quad [4]$$

I valori minimi di R_2 sono riportati nella tabella 1.

Valori di R_2 minimi per intersezioni omogenee [m]			
δ	Strade locali	Strade di quartiere	Strade di scorrimento
65°	10	17	38
90°	8	12	25
110°	6	10	18

Tabella 1 – Valori del raggio R_2 consigliati dal CNR.

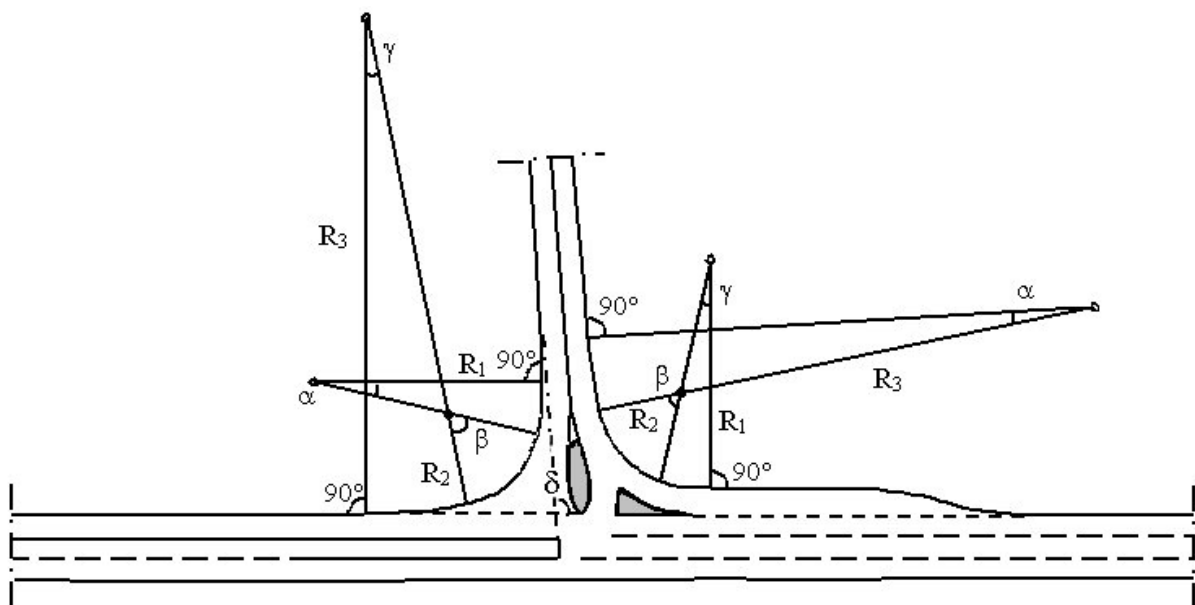


Figura 4 – Sagomatura dei cigli delle corsie di svolta a destra a mezzo delle tricentriche (Normativa CNR).

Nelle intersezioni tra strade a caratteristiche differenti (ad esempio una principale e una secondaria) i raggi R_2 minimi da adottare sono quelli relativi alla strada più importante.

Le stesse curve vengono utilizzate anche per il tracciamento dei cigli dei marciapiedi. È eccezionalmente consentito l'uso di una sola curva circolare di raggio minimo 8 m, se l'utenza è di sole autovetture, e di 12 m in tutti gli altri casi.

2.2. Le Norme tedesche (R.A.S.T.)

Tali norme (RAL-K – Planfreie Knotenpunkte – 1976, RAST-E – Erschliessung – 1971) fanno riferimento alla transitabilità in curva dei mezzi pesanti e prevedono l'utilizzo di curve tricentriche non simmetriche, con qualche differenza nei rapporti tra i raggi e gli angoli rispetto alla normativa italiana. In particolare:

$$\alpha = 17.5^\circ; \beta = 22.5^\circ; R_1 : R_2 : R_3 = 2 : 1 : 3 \quad [5]$$

Le curve così tracciate consentono un franco laterale in manovra, da entrambi i lati del mezzo pesante, pari a quello del rettilineo di provenienza.

2.3. Le Norme francesi

Le norme francesi (Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison - 1970) prevedono l'uso di un'unica curva circolare di raggio R

solo per angoli di deviazione $\delta \leq 90^\circ$; per angoli superiori, l'elemento circolare di raggio minimo (nei raccordi a due centri R_1 , in quelli a tre centri R_2) dovrà essere raccordato agli allineamenti con uno o due cerchi di raggio maggiore secondo quanto prescritto nella tabella 2.

In figura 5 sono riportati, per la curva a tre centri consigliata dalle norme francesi, tutti i parametri necessari alla caratterizzazione geometrica.

Angolo di deviazione δ	Veicolo di progetto	Raggio unico R [m]	Tricentrica simmetrica				Tricentrica asimmetrica					Curva a due centri			
			R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_3 [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	ΔR [m]	
30°	Autovettura	15													
	Autocarro	35													
	Autoarticolato	55	60	30	60	0,60	60	25	90	0,40	2,10	35	100	1,20	
45°	Autovettura	13													
	Autocarro	30	35	20	35	0,80	25	20	40	0,10	0,70	23	50	0,50	
	Autoarticolato	40	30	25	30	1,20	50	20	70	0,20	2,30	25	80	1,80	
60°	Autovettura	11	20	7	20	0,50						8	20	0,70	
	Autocarro	25	30	17	30	0,45	18	15	35	0,10	1,20	15	35	1,20	
	Autoarticolato	30	45	16	45	1,20	45	15	60	0,80	2,00	20	60	1,80	
75°	Autovettura	9	18	6	18	0,75	15	6	20	0,25	0,90	7	20	0,80	
	Autocarro	20	25	13	25	0,85	17	13	30	0,35	1,00	14	30	0,90	
	Autoarticolato	25	40	14	40	1,00	35	14	50	0,60	1,40	16	55	0,80	
90°	Autovettura	7	20	5	20	0,70	15	5,4	20	0,20	0,80	6	20	0,50	
	Autocarro	15	30	10	30	1,00	30	10	45	0,50	1,45	14	30	0,50	
	Autoarticolato	25	40	13	40	1,70	35	12	50	0,60	3,40	14	70	2,20	
120°	Autovettura		20	4,2	20	0,50	20	4,5	25	0,20	0,50	4,6	25	0,60	
	Autocarro		25	8,6	25	0,90	25	8,6	40	0,40	1,40	10,5	30	0,60	
	Autoarticolato		70	7	70	3,40	20	8	75	1,50	3,80	11	75	3,00	
150°	Autovettura		15	3,7	15	0,50	15	3	20	0,80	1,40				
	Autocarro		25	7,5	25	1,00	25	7,5	40	0,75	1,10				
	Autoarticolato						20	7,5	75	1,60	4,00				
180°	Autovettura		15	3,2	15	0,60	6	2,6	10	1,00	1,40				
	Autocarro		20	6	20	1,90	20	6	35	1,70	2,10				
	Autoarticolato						15	7,5	75	1,60	3,40				

Tabella 2 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio (Norme francesi).

Questo tipo di curva di ciglio è consigliata anche per angoli δ compresi tra 30° e 90° , soprattutto se il veicolo tipo per il dimensionamento è un mezzo pesante.

Le larghezze c_i della corsia di svolta che consentono il passaggio fisico del veicolo tipo, con un franco laterale di 0,6 m per i veicoli leggeri e di 0,5 m per quelli pesanti, si ricavano dalla tabella 3 in funzione del raggio interno della svolta, e della larghezza del veicolo.

Schema di traffico	Vettura	Autocarro	Autoarticolato
C ₁	3 + 8 / R	3,5+22,5/R	3,5 + 55/R
C ₂	4,2+16/R	5,5+45/R	5,5 + 110/R
C ₃	6 + 16/R	7+45/R	7 + 110/R

Tabella 3 – Larghezze della corsia di svolta (Norme francesi).

Gli schemi di traffico riportati nella tabella 3 fanno riferimento alle tre seguenti situazioni:

- ◆ C₁: una fila in movimento;
- ◆ C₂: una fila in movimento, una fila in sosta all'interno;

- ◆ C₃: due file in movimento nello stesso senso o in senso opposto.

I veicoli tipo presi in esame dalle Norme francesi presentano le caratteristiche geometriche descritte nella tabella 4.

Veicolo tipo		Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	Sbalzo anteriore [m]	Sbalzo posteriore [m]	Carreggiata [m]	R Interno [m]	R esterno [m]
Autovettura		5,0	1,8	3,1	1,0	0,9	1,4	3,2	5,5
Autocarro		10,0	2,5	5,5	1,5	3,0	1,9	6,5	10,0
Autoarticolato	Trattore	5,4	2,5	2,7	1,45	1,25	1,9	-	12,5
	Rimorchio	12,2	2,5	8,15	-	2,65	1,9	5,3	-

Tabella 4 – Caratteristiche geometriche dei veicoli di riferimento per la Normativa francese.

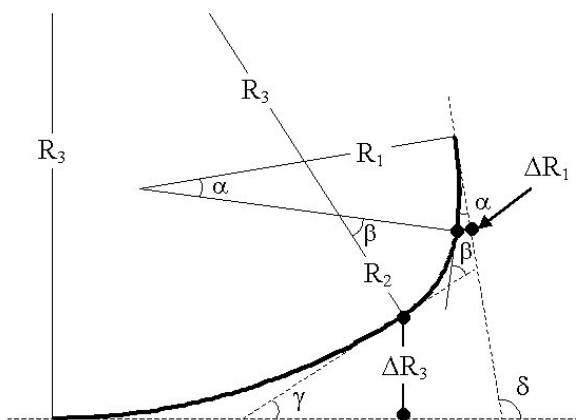


Figura 5 – Raggi, angoli e scostamenti per la policentrica di ciglio adottata dalla Normativa francese.

2.4. Le Norme USA (A.A.S.H.O.)

Le norme americane (A.A.S.H.O. – A Policy on Design of Urban Highways and Arterial Streets – 1973) sulla base delle caratteristiche di 5 tipologie di veicoli (Tab. 5) e su considerazioni inerenti alla velocità in curva, propongono, per valori interi dell'angolo di deviazione δ , il tipo di curva da adottare (o cerchio a raggio unico o tricentriche) ed i valori corrispondenti dei raggi di svolta e degli scostamenti (Tab. 6).

Per quanto riguarda il significato dei simboli riportati nella tabella 6 si può fare ancora riferimento alla curva tricentrica rappresentata in figura 5.

Veicolo tipo		Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	Sbalzo anteriore [m]	Sbalzo posteriore [m]	R minimo [m]	R interno minimo [m]
Autovettura (P)		5,7	2,1	3,3	0,9	1,5	7,3	4,7
Autocarro (SU)		9,0	2,55	6,0	1,2	1,8	12,8	8,7
Autobus (BUS)		12,0	2,55	7,5	2,1	2,4	12,9	6,2
Autoarticolato	Medio (WB40)	15,2	2,55	12,2	1,2	1,8	12,2	6,1
	Lungo (WB 50)	16,7	2,55	15,2	0,9	0,6	13,7	6,0

Tabella 5 – Caratteristiche geometriche dei veicoli di riferimento per la Normativa americana (A.A.S.H.O.).

Dall'esame della tabella 6 si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Raggi compresi tra 5 e 8 m si possono utilizzare per incroci tra strade secondarie con predominanza di traffico leggero, anche se sarebbero preferibili raggi di almeno 8-9 m.
- Raggi centrali di 12 m con curve di raccordo a tre cerchi, si adottano per tutte le svolte interessate da

traffico pesante. L'aumento del raggio minimo oltre i 12 m è auspicabile quando si vogliono evitare riduzioni della velocità a valori bassissimi.

- All'aumentare dell'angolo di deviazione non sono consigliabili curve di ciglio ad un solo cerchio, inoltre per i veicoli pesanti (del tipo WB 40 o WB 50) sono indispensabili tricentriche simmetriche o asimmetriche.

➤ A parità di angolo di svolta, all'aumentare delle dimensioni del veicolo di progetto non corrisponde l'aumento dei raggi componenti la tricentrica, bensì

quello del ΔR o (ΔR_1 e ΔR_3), ciò significa che arretra, rispetto al rettilo di appoggio, il cerchio minimo R_2 e aumenta la lunghezza dei raccordi.

Angolo di deviazione δ	Veicolo di progetto	Raggio unico	Tricentrica simmetrica				Tricentrica asimmetrica				
		R [m]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	R ₃ [m]	ΔR [m]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	R ₃ [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_3 [m]
30°	P	18									
	SU	30									
	BUS	40									
	WB40	50									
	WB50	60									
60°	P	12									
	SU	18									
	BUS	21									
	WB40	27									
	WB50		60	22	60	1,70	60	22	85	0,60	1,80
75°	P	11	30	8	30	0,60					
	SU	17	36	14	36	0,60					
	BUS	24	36	14	36	0,90					
	WB40	26	36	14	36	1,50	36	14	60	0,60	2,00
	WB50		45	15	45	1,80	45	15	70	0,60	3,00
90°	P	9	30	6	30	0,75					
	SU	15	36	12	36	0,60					
	BUS	26	36	12	36	1,20					
	WB40		36	12	36	1,50	36	12	60	0,60	1,80
	WB50		55	18	55	1,80	36	12	60	0,60	3,00
105°	P		30	6	30	0,75					
	SU		30	11	30	0,90					
	BUS		30	11	30	1,20					
	WB40		30	11	30	1,50	30	11	60	0,60	2,40
	WB50		55	14	55	2,40	45	12	64	0,60	3,00
120°	P		30	6	30	0,60					
	SU		30	9	30	0,90					
	BUS		30	9	30	1,20					
	WB40		36	9	36	1,80	30	9	55	0,60	2,70
	WB50		55	12	55	2,60	45	11	67	0,60	3,60
150°	P		23	6	23	0,60					
	SU		30	9	30	1,20					
	BUS		30	9	30	1,50					
	WB40		30	9	30	1,80	27	8	50	0,90	3,30
	WB50		50	11	50	2,10	36	9	55	0,90	4,30
180° (Svolta ad U)	P		15	5	15	0,15					
	SU		30	9	30	0,50					
	BUS		40	8	40	2,40					
	WB40		30	6	30	2,90	26	6	46	1,80	4,0
	WB50		40	8	40	2,90	30	8	46	1,80	4,0

Tabella 6 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio (Norme USA – A.A.S.H.O.).

3. STERZATURA CINEMATICA DEI VEICOLI

Si è già osservato che la definizione geometrica delle curve di ciglio da impiegare nelle intersezioni a raso si basa sullo schema di sterzata cinematica dei veicoli, ossia ammettendo un moto di puro rotolamento dei veicoli lungo una traiettoria curva. Ciò è motivato dalle basse velocità con cui, soprattutto in ambito urbano, vengono eseguite le manovre di svolta.

In tale contesto si intende analizzare sinteticamente le modalità di sterzata cinematica di alcuni tipi di veicoli, anche al fine di comprendere le considerazioni che verranno svolte nel prosieguo della presente trattazione.

3.1. Sterzata di un veicolo a due assi

Si consideri inizialmente un veicolo a due assi, uno dei quali sterzante (in genere l'avantreno), in cui ogni ruota abbia la possibilità di sterzare indipendentemente dalle altre. Si ipotizzino nulli gli angoli di campanatura e si supponga che l'eventuale moto di rollio del veicolo non sia causa di azioni sterzanti (soprattutto per quanto riguarda il retrotreno).

Il veicolo si trova in condizione di sterzata cinematica se le normali ai piani medi delle ruote, condotte dai centri delle ruote stesse, si incontrano nel punto O, centro di curvatura della traiettoria (Fig. 6). Tramite semplici considerazioni geometriche è possibile dedurre la relazione che deve soddisfare il meccanismo di sterzo affinché possa realizzarsi la sterzata cinematica, ovvero:

$$\cotg\delta_2 - \cotg\delta_1 = t/l \quad [6]$$

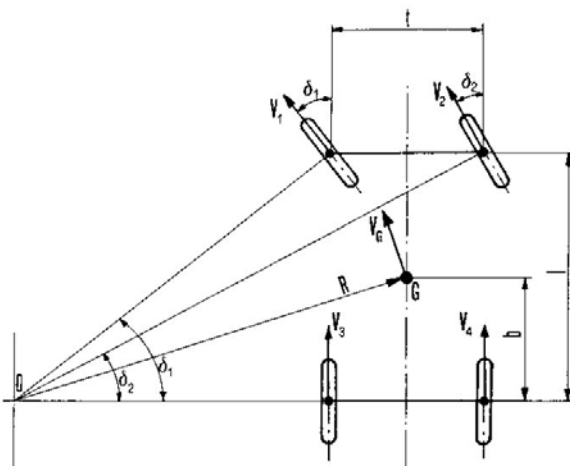


Figura 6 – Sterzata cinematica di un veicolo a quattro ruote.

In effetti, nei casi reali, i meccanismi di sterzo possiedono un errore intrinseco, dipendente dagli angoli di sterzo, per cui la [6] non è mai pienamente soddisfatta.

Per valutare quest'errore caratteristico è sufficiente esprimere l'angolo δ_2 della ruota esterna in funzione dell'angolo δ_1 della ruota interna, ricavandolo dalla [6]. Si indichi questo valore "corretto" con δ_{2c} .

Sottraendo da tale valore il valore effettivo dell'angolo δ_2 si determina l'errore di sterzata (in funzione di δ_1):

$$\Delta\delta_2 = \delta_{2c} - \delta_2 \quad [7]$$

Sempre con riferimento allo schema di figura 6, il valore del raggio di curvatura della traiettoria del baricentro è fornito dalla relazione:

$$R = \sqrt{b^2 + R_1^2} = \sqrt{b^2 + (l \cotg\delta_1 + t/2)^2} = \sqrt{b^2 + (l \cotg\delta_2 - t/2)^2}$$

Al fine di semplificare le relazioni e snellire le procedure di calcolo è possibile schematizzare il veicolo a quattro ruote come un veicolo a due ruote (Fig. 7).

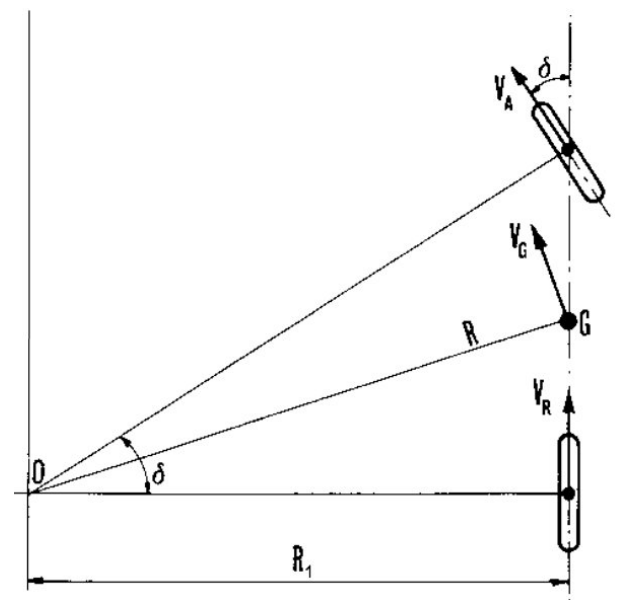


Figura 7 – Sterzata cinematica di un veicolo a due ruote.

Ciò consente di unificare gli angoli di sterzo dell'avantreno in un unico angolo δ , definito come media aritmetica dei due valori δ_1 e δ_2 :

$$\cotg\delta = \frac{R_1}{l} = \frac{(\cotg\delta_1 + \cotg\delta_2)}{2} \quad [8]$$

In questo caso il valore del raggio di curvatura della traiettoria del baricentro è fornito dalla relazione:

$$R = \sqrt{b^2 + R_1^2} = \sqrt{b^2 + l^2 \cotg^2\delta} \quad [9]$$

Per valori abbastanza elevati del raggio di curvatura la relazione si semplifica come segue:

$$R \cong l \cotg\delta \cong \frac{l}{\delta} \quad [10]$$

3.2. Sterzata di un veicolo a più di due assi

Nel caso di veicolo a tre assi, con avantreno sterzante e con distanza tra gli assi non sterzanti trascurabile rispetto al passo, è conveniente assimilare questi ultimi ad un unico asse (Fig. 8). Si ricade, pertanto, nel caso analizzato al paragrafo precedente.

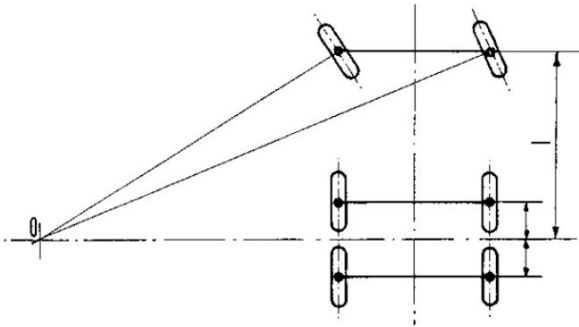


Figura 8 – Sterzata cinematica di un veicolo a tre assi di cui uno sterzante.

Se il veicolo a tre assi possiede due assi sterzanti (Fig. 9), la determinazione delle relazioni degli angoli di deviazione non presenta problemi. Detti δ_1 , δ_2 gli angoli di deviazione dell'avantreno e δ_5 , δ_6 quelli dell'asse sterzante del retrotreno, e indicate le distanze tra l'asse centrale (non sterzante) e gli assi sterzanti con l_a (distanza asse centrale-avantreno) e l_b (distanza asse centrale-retrotreno), applicando semplici relazioni geometriche, le espressioni assumono la seguente forma:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{l_a}{R_1 - t/2} \quad [11]$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{l_a}{R_1 + t/2} \quad [12]$$

$$\operatorname{tg} \delta_5 = \frac{l_b}{R_1 - t/2} \quad [13]$$

$$\operatorname{tg} \delta_6 = \frac{l_b}{R_1 + t/2} \quad [14]$$

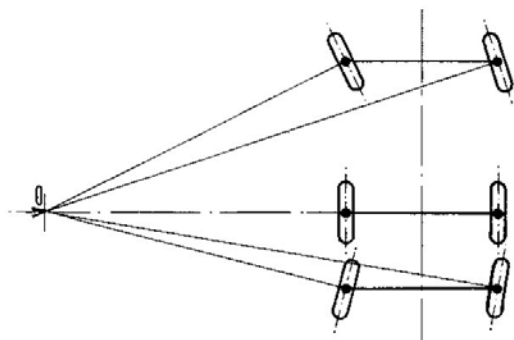


Figura 9 – Sterzata cinematica di un veicolo a tre assi di cui due sterzanti.

3.3. Sterzata di un rimorchio ad un asse

Consideriamo, in primo luogo, il caso di un rimorchio ad un asse trainato da una motrice a due assi.

Si suppone che il meccanismo di sterzo della motrice consenta al veicolo di compiere correttamente manovre di sterzo di tipo cinematico. Il punto di snodo, che si indicherà con A, è posto sulla congiungente dei punti medi degli assi della motrice e, in questo caso, sarà esterno ad essi (Fig. 10).

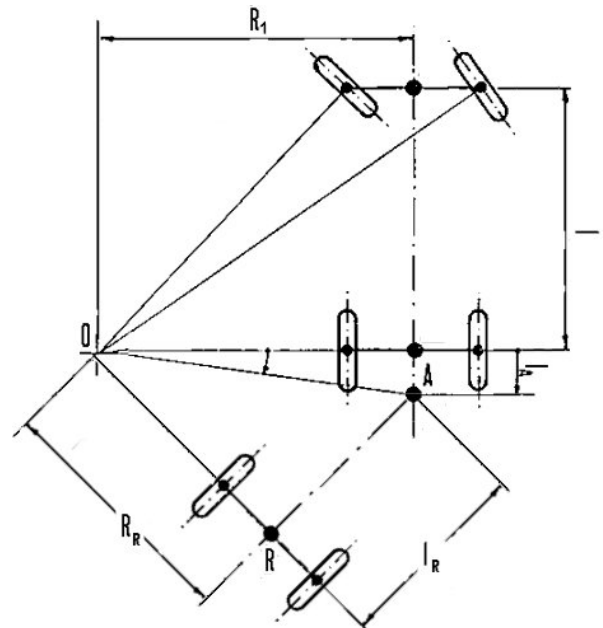


Figura 10 – Sterzata cinematica di un rimorchio ad un asse.

Da semplici considerazioni geometriche si ricava la relazione che lega il raggio R_R della traiettoria di R al raggio R_1 che descrive la traiettoria del centro del retrotreno della motrice:

$$R_R = \sqrt{R_1^2 + l_A^2 + l_R^2} \quad [15]$$

con:

- l_A = distanza tra snodo e retrotreno della motrice;
- l_R = lunghezza del rimorchio.

Il calcolo della traiettoria del punto R può eseguirsi agevolmente come segue.

Si stabilisca quale posizione iniziale del veicolo quella in cui motrice e rimorchio sono allineati, con le ruote direttrici già sterzate (Fig. 11).

Negli istanti successivi la motrice comincerà a percorrere la traiettoria circolare di centro O; il punto A descriverà, quindi, un arco di cerchio di raggio R_A . Si consideri positivo l'angolo φ che sottende il segmento AB se lo snodo A è interno agli assi della motrice (caso di autoar-

icolato a tre assi); si consideri negativo se A è esterno (caso di rimorchio ad un asse trainato da motrice a due assi).

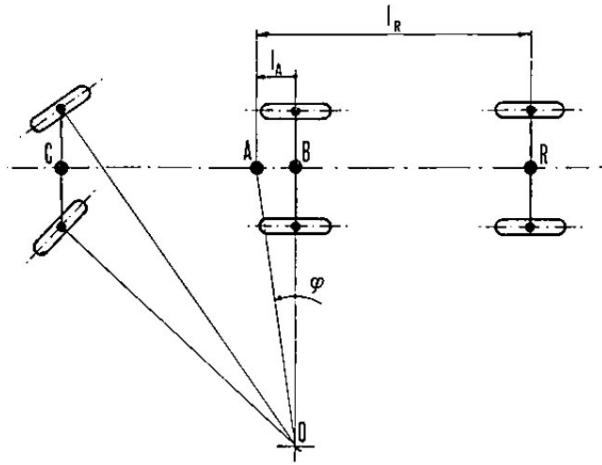


Figura 11 – Configurazione iniziale della traiettoria di un veicolo a due assi con rimorchio ad un asse.

Al generico istante t la motrice avrà ruotato di un angolo α ed il rimorchio di un angolo β . Congiungendo le normali condotte dai piani medi delle ruote del rimorchio e del retrotreno della motrice, si individua il punto O_1 , centro di istantanea rotazione del rimorchio (Fig. 12).

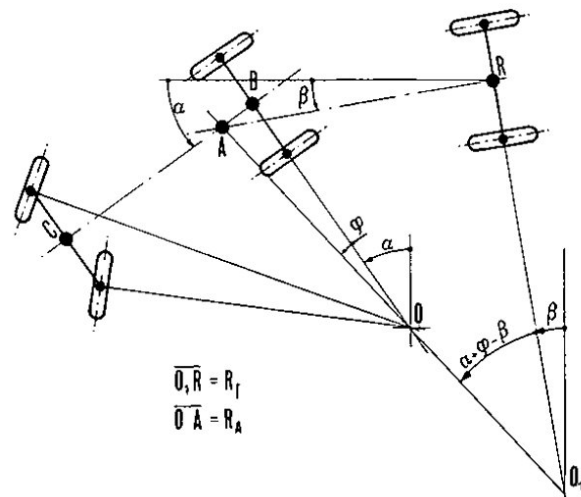


Figura 12 – Configurazione al tempo t della traiettoria di un veicolo a due assi con rimorchio ad un asse.

All'istante successivo $t+dt$ la motrice, continuando il percorso, avrà ruotato di un ulteriore angolo $d\alpha$, portando A in A'; il rimorchio, invece, avrà ruotato di un angolo $d\beta$, spostando il centro del suo asse da R ad R'.

Le posizioni del veicolo al tempo t ed al successivo istante $t+dt$ sono rappresentate in figura 13. Si è indicato con A'' la proiezione di A' sulla congiungente \overline{AR} .

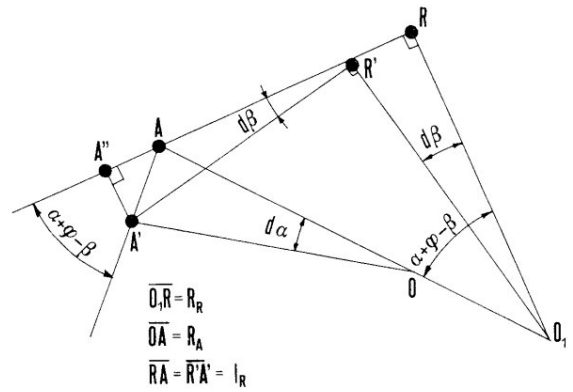


Figura 13 – Posizioni del veicolo al tempo t e al tempo $t+dt$.

Tenendo conto del fatto che $\overline{AA'}$, $\overline{RR'}$ e $\overline{AA''}$ sono lunghezze infinitesime rispetto ad \overline{AR} e $\overline{A'R'}$ e trascurando gli infinitesimi di ordine superiore, si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{cases} \overline{AA'} = R_A d\alpha \\ \overline{A'A''} = l_r d\beta \\ \overline{A'A''} = \overline{AA'} \sin(\alpha + \varphi - \beta) \end{cases} \quad [16]$$

che fornisce l'equazione differenziale:

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{R_A}{l_r} \sin(\alpha + \varphi - \beta) \quad [17]$$

Imponendo le condizioni al contorno: $\alpha = \beta = 0$ per $t = 0$ e supponendo che lo snodo A percorra una traiettoria di raggio $R_A = \text{cost}$, separando le variabili e integrando, si ottiene l'espressione dell'angolo α :

$$\alpha = \frac{1}{a} \ln \left[\frac{1 - (b-a) \operatorname{tg} \frac{\alpha + \varphi - \beta}{2}}{1 - (b+a) \operatorname{tg} \frac{\alpha + \varphi - \beta}{2}} \cdot \frac{1 - (b+a) \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{1 - (b-a) \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \right] \quad [18]$$

in cui le costanti a e b dipendono dal raggio di curvatura del punto A e dalla lunghezza del rimorchio; più esattamente:

$$a = \sqrt{\frac{R_A^2}{l_r^2} - 1}, \quad b = \frac{R_A}{l_r} \quad [19]$$

In definitiva, il raggio di curvatura R_R della traiettoria del rimorchio è dato da:

$$R_R = \frac{l_r}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi - \beta)} \quad [20]$$

3.4. Sterzata di un rimorchio a due o più assi

Nei veicoli con rimorchio a due assi, di cui uno solo sterzante, la sterzata è generalmente realizzata mediante l'uso di un carrello solidale al timone (Fig.14).

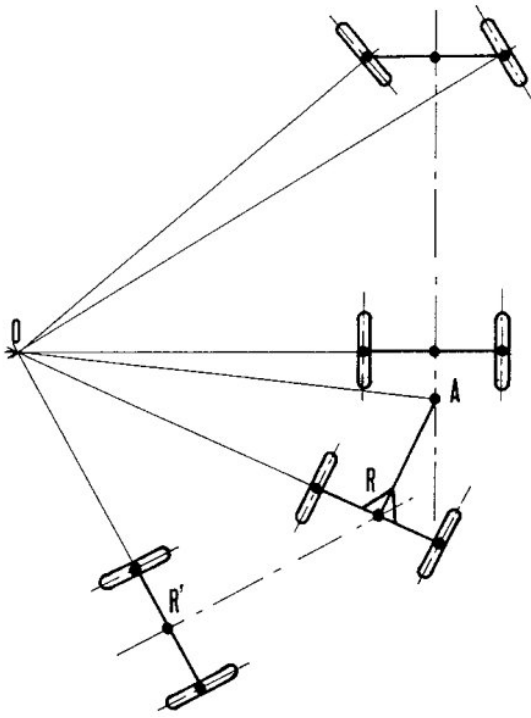


Figura 14 – Sterzata cinematica di un rimorchio a due assi di cui uno sterzante.

Le condizioni per una corretta sterzata cinematica sono sempre verificate e la traiettoria può essere studiata schematizzando il rimorchio come due rimorchi ad un asse posti in serie, il primo dei quali è costituito dal timone e dal carrello sterzante.

Analogamente a quanto fatto in precedenza con riferimento a rimorchi ad un solo asse, è possibile tracciare per punti la traiettoria di un rimorchio a due assi che si porta dalla configurazione di marcia in rettilineo a quella che caratterizza la marcia in curva a regime, trainato da una motrice che percorre una traiettoria circolare. La differenza è che, mentre nel primo caso il punto R è collegato al punto A che si muove su un cerchio, nel secondo caso il punto R' è collegato al punto R che si muove su una traiettoria avente raggio di curvatura variabile.

Se si vuole studiare la traiettoria di R', quindi, l'equazione differenziale:

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{R_A}{l_r} \sin(\alpha + \varphi - \beta) \quad [21]$$

non può essere integrata analiticamente, ma il problema può essere agevolmente studiato per via numerica.

Se la sterzata viene attuata mediante snodi indipendenti per ogni ruota, affinché il meccanismo di sterzo realizzi una sterzata cinematica, esso dovrà soddisfare una relazione analoga alla: $\cotg\delta_2 - \cotg\delta_1 = t/l$.

Nel caso di veicoli con rimorchio a più assi non sterzanti è impossibile che avvenga una corretta sterzata cinematica: valgono le considerazioni effettuate per i veicoli a più di due assi.

4. IL SOFTWARE AUTO-TURN PER LA SIMULAZIONE DELLE MANOVRE DI SVOLTA

Al fine di rendere più agevole la simulazione delle traiettorie di svolta a destra si è fatto uso di un software di simulazione che ha consentito di snellire notevolmente la fase di restituzione dei dati necessari alla rielaborazione della metodologia di tracciamento delle curve di ciglio.

Il software in questione, denominato Auto-Turn (Transoft Solutions Inc. Canada), lavorando in ambiente CAD, simula la percorrenza in curva di un veicolo, una volta assegnata la traiettoria sulla quale deve transitare il centro dell'asse sterzante del veicolo stesso.

Alla base dell'algoritmo del software in questione ci sono due ipotesi fondamentali, una sul raggio di sterzata ed una sulla velocità. In particolare:

- le simulazioni sono possibili solo se le manovre di svolta sono consentite dal raggio di sterzata del veicolo;
- la velocità di percorrenza del veicolo è limitata a 15 km/h. A tale velocità si può parlare di sterzata cinematica (valgono pertanto le considerazioni svolte al paragrafo precedente e le relative formulazioni matematiche).

I dati di output forniti da Auto-Turn, inoltre, sono da considerarsi significativi solo se sussistono una o più delle seguenti condizioni:

1. Condizioni di strada asciutta. Non vengono infatti contemplate le situazioni sfavorevoli in termini di aderenza (superfici bagnate o ghiacciate).
2. Veicoli pesanti a due o a tre assi. Non si considerano i veicoli per trasporti di carichi eccezionali aventi più di tre assi.
3. Veicoli con un massimo di quattro ruote per asse;
4. Veicoli con il solo asse anteriore sterzante.

Il software fa riferimento ad una serie di veicoli predefiniti utilizzati come riferimento dalle seguenti normative internazionali:

- A.A.S.H.O. (U.S.A.)
- Caltrans (U.S.A.)
- T.A.C. 1984 (Canada)

- T.A.C. 1998 (Canada)
- Austroroads (Australia)
- U.K. (Inghilterra)
- R.O.A. (Olanda)
- Dansk (Danimarca)

Per l'utilizzo di Auto-Turn bisogna compiere i seguenti passi:

- definire i veicoli da impiegare per la simulazione, oppure utilizzare quelli di default;
- tracciare, con i comandi CAD, il percorso che il veicolo deve compiere; esso può essere composto da archi di circonferenza e da rette aventi la stessa tangente nei punti di congiunzione, in numero minimo di due e massimo di cento, o da singole polilinee;
- avviare la simulazione;
- importare, leggere e salvare i dati di output.

Un esempio di simulazione è riportato nella figura 15. In essa è rappresentato un mezzo (in particolare un'autovettura dell'A.A.S.H.O.) che esegue la manovra di svolta a destra su un'intersezione a raso. Le linee raffigurate indicano:

- la traiettoria della mezzeria delle ruote sterzanti (quella assegnata);
- le traiettorie delle due coppie di ruote (esterne ed interne) del veicolo (quelle ottenute dalla simulazione).

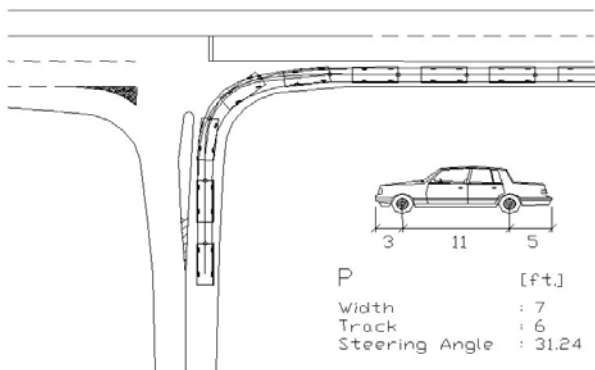


Figura 15 – Esempio di simulazione eseguita con Auto-Turn.

Dopo l'avvio della procedura di simulazione, il software restituisce quattro diverse tipologie di output:

- ◆ disegno della traiettoria delle ruote esterne e interne del veicolo (viene pertanto visualizzata la traiettoria che il veicolo ha compiuto; ciò permette di avere una prima impressione visiva sulla attendibilità o meno dei risultati ottenuti);

- ◆ rappresentazione animata della traiettoria eseguita dal veicolo (si possono apprezzare “in presa diretta” le manovre compiute per una determinata svolta);
- ◆ diagramma degli angoli di sterzata delle ruote anteriori e dell'angolo che si forma tra trattore e rimorchio di autotreni e autoarticolati, durante la percorrenza della curva (Figure 16 e 17);
- ◆ dati sulle traiettorie percorse e sugli angoli suddetti (Fig. 18). Questo output rappresenta in pratica la tabulazione di quelli precedenti; si ottengono cioè in forma di dati analitici tutte le informazioni sulla manovra di svolta compiuta e cioè:
 - dati sul veicolo (tipo, dimensioni, angolo massimo di sterzata);
 - dati sul percorso (lunghezza totale, numero di tratti rettilinei e di tratti curvi di cui è composto, angoli e raggi di ogni singolo tratto curvo, punti di inizio e fine di ogni tratto);
 - dati sulla percorrenza del veicolo su ogni singolo tratto (angoli di sterzata all'inizio e fine di ogni singolo tratto sia curvo che rettilineo e angoli fra trattore e rimorchio).

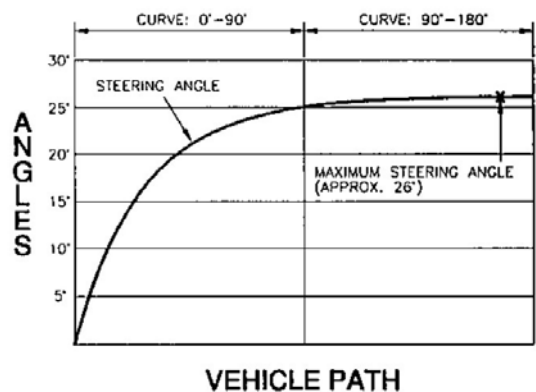


Figura 16 – Diagramma di sterzata di un'autovettura.

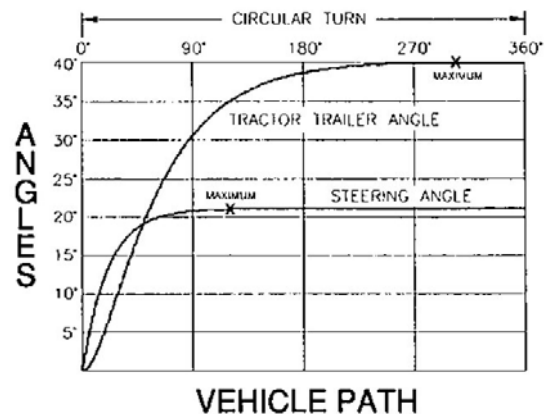


Figura 17 – Diagramma di sterzata di un'autoarticolato.

AutoTURN 3.0 Vehicle Turning Simulation Report							
Vehicle	: euro-d-						
Report	: Studio traiettorie intersezioni a raso.dwg						
Date	: Mar 21,2002						
Vehicle Dimensions:							
A	:	1.38	n	1300.00	mm		
B	:	5.50	n	5500.00	mm		
C	:	2.21	n	2210.00	mm		
D	:	2.22	n	2220.00	mm		
E	:	0.74	n	740.00	mm		
F	:	3.41	n	3400.00	mm		
G	:	12.00	n	12000.00	mm		
H	:	2.00	n	2000.00	mm		
I	:	2.50	n	2500.00	mm		
J	:	2.50	n	2500.00	mm		
K	:	2.04	n	2040.00	mm		
L	:	1.81	n	1811.00	mm		
M	:	40.00	deg.	40.00	deg.		
N	:	52.00	deg.	52.00	deg.		
Total Path Length	:	82.92	n				
Vehicle Length	:	21.74	n				
Section 1							
		x	y	Length	Degrees		
Straight	Start	13647.1	5226.3	10.2	90.0		
	End	13647.1	5236.6				
Vehicle Angles				Initial	Final	Max	
	Steering			0.00	0.00	0.00	
	Tractor/Trailer			0.00	0.00	0.00	
	Total			0.00	0.00	0.00	
Section 2							
		x	y	Length	Degrees	Radius	
Curve	Start	13647.1	5236.6	37.7	90.0	CCW	24.0
	End	13623.1	5260.6				
Vehicle Angles				Initial	Final	Max	
	Steering			0.00	13.26	13.26	
	Tractor/Trailer			0.00	27.41	27.41	
	Total			0.00	40.67	40.67	
Section 3							
		x	y	Length	Degrees		
Straight	Start	13623.1	5260.6	35.0	180.0		
	End	13588.1	5260.6				
Vehicle Angles				Initial	Final	Max	
	Steering			13.26	0.02	13.26	
	Tractor/Trailer			27.41	3.28	27.41	
	Total			40.67	3.30	40.67	

Figura 18 – Report conclusivo del software Auto-Turn.

5. L'ITER PROCEDURALE ADOTTATO PER LA VERIFICA DELLE TRAIETTORIE DI SVOLTA

La procedura adottata per la verifica delle traiettorie di svolta nelle intersezioni può essere schematizzata nei seguenti punti:

- È stato selezionato un campione significativo di veicoli appartenente alle tipologie di veicoli così definite: autoveicoli leggeri, autocarri, bus, autoarticolati. Nella tabella 7 sono riportate le caratteristiche geometriche dei veicoli prescelti. Si noti in particolare come si siano scelti più “esemplari” della stessa tipologia di veicolo (4 autovetture, 6 autocarri, 2 bus, 2 autoarticolati), al fine di testare il comportamento di un campione rappresentativo del parco veicolare circolante nel nostro paese.
- Sono stati ricostruiti, in ambiente CAD, gli scenari in cui “ambientare” le simulazioni delle manovre di svolta: si tratta di una serie di intersezioni a raso, nelle quali, gli angoli di deviazione dei cigli sono compresi tra 60° e 120°, ad intervalli consecutivi di 5° per volta.

Categoria di veicolo	Denominazione del veicolo	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	Sbalzo anteriore [m]	Sbalzo posteriore [m]	Angolo di sterzata
Veicolo leggero	Fiat Tipo	4,500	1,400	3,500	0,500	0,500	35°
	Fiat Punto	3,760	1,625	2,450	0,810	0,500	34°
	Renault Espace	4,430	1,795	2,580	1,100	0,750	36°
	BMW 740i	5,000	1,845	2,833	1,207	0,960	35°
Autocarro	IVECO Serie: Eurocargo	8,520	2,280	4,815	1,200	2,505	37°
	IVECO Serie: Eurotrakker	8,725	2,500	4,515	1,440	2,770	34°
	IVECO Serie: EuroTech	9,510	2,500	5,335	1,380	2,795	35°
	IVECO Serie: EuroTech Cursor	9,679	2,500	5,798	1,380	2,501	38°
	IVECO Serie: Eurocargo	9,965	2,460	5,670	1,290	3,005	37°
	IVECO Serie: EuroTech Cursor	11,080	2,500	6,300	1,380	3,400	40°
Bus	IVECO Serie: Euromidi	7,920	2,165	4,455	1,185	2,280	36°
	IVECO Serie: Euroclass	10,620	2,500	5,520	1,860	3,240	44°
Autoarticolato medio	IVECO Serie: EuroTech Cursor	15,700	2,500	13,020	1,380	1,300	42°
	IVECO Serie: EuroStar Cursor	16,100	2,500	13,220	1,380	1,500	44°

Tabella 7 – Veicoli utilizzati per le simulazioni delle manovre di svolta.

Si osservi che, per ogni valore dell'angolo di deviazione, sono state disegnate ben 21 intersezioni. Si è agito cioè facendo variare il raggio centrale della tri-centrica (R_2) da un valore minimo di 5 metri ad un massimo di 25 metri, ad intervalli successivi di 1 m. I raggi R_1 ed R_3 , nonché le grandezze angolari, sono stati tracciati in ottemperanza alle norme italiane del CNR.

- Sono state eseguite le varie simulazioni: ad ogni veicolo sono state fatte percorrere le 13 traiettorie di svolta relative ad ognuna delle 21 intersezioni associate ai diversi angoli di deviazione. Per ogni veicolo sono state avviate 273 simulazioni. Il numero complessivo delle simulazioni è stato pertanto pari a 3822. Nelle figure 19, 20 e 21 sono riportati alcuni esempi delle simulazioni eseguite.

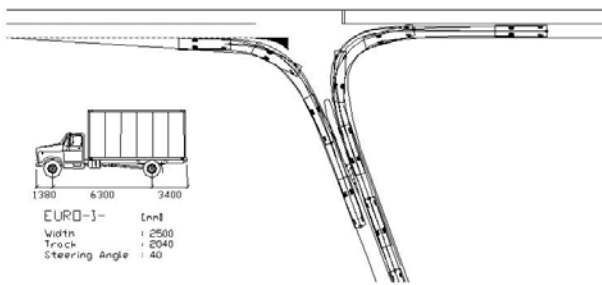


Figura 19 – Simulazione di svolta (veicolo tipo: autocarro; angoli di deviazione: $\delta = 110^\circ$, $\delta = 70^\circ$).

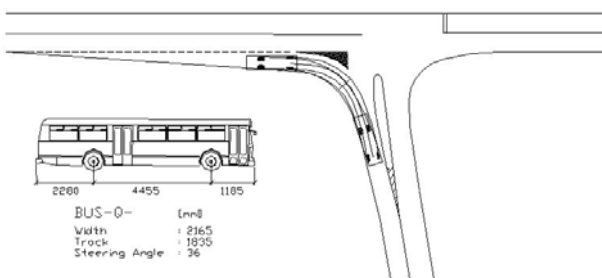


Figura 20 – Simulazione di svolta (veicolo tipo: bus; angolo di deviazione: $\delta = 100^\circ$).

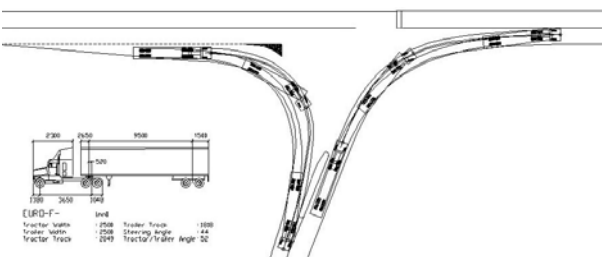


Figura 21 – Simulazione di svolta (veicolo tipo: autoarticolato; angoli di deviazione: $\delta = 70^\circ$, $\delta = 110^\circ$).

- A completamento delle elaborazioni eseguite si è passati all'analisi dei dati risultanti. In particolare, dall'osservazione dei tabulati ottenuti e dal riscontro con gli output grafici, è stato possibile selezionare quegli output caratterizzati dal seguente requisito fondamentale: i veicoli che svoltano rientrano interamente all'interno di una fascia d'ingombro definita dalle tracce (interne ed esterne) della sagoma dei veicoli distanziate dalle due curve delimitanti (quella di ciglio e quella, teorica, interna alla zona di intersezione) di un ulteriore franco laterale (pari a 0,5 m nel caso dei veicoli leggeri e pari a 0,6 per tutte le altre categorie veicolari). Si è definito **inserimento ottimale**, la manovra di svolta soddisfacente il criterio appena enunciato.

In figura 22 è riportato un esempio di fascia d'ingombro relativa ad un autoarticolato.

Si osservi che si è deciso di far riferimento alla sagoma esterna dei veicoli, anziché alla sola traccia delle ruote, in virtù del fatto che è proprio l'ingombro complessivo a determinare la fruibilità degli spazi nel contesto di un'intersezione a raso. Non sono infatti rari, i casi reali in cui i veicoli in fase di svolta urtano con la carrozzeria (e non solo con le ruote) gli elementi che compongono l'arredo urbano.

- La fase conclusiva dell'analisi dei dati si è così articolata:
 - ◆ In primo luogo sono stati selezionati i parametri geometrici caratterizzanti le diverse fasce d'ingombro per i vari veicoli: si è adottato il criterio di ritenere "geometricamente corrette" le fasce d'ingombro in grado di "ospitare" tutti i veicoli appartenenti a ciascuna delle quattro classi veicolari considerate. Ciò vuol dire che, ad esempio, nel caso dei 6 veicoli che individuano la categoria veicolare composta dagli autocarri, la fascia d'ingombro è definita univocamente dai parametri geometrici (raggi e scostamenti) che permettono l'inserimento in curva di tutti i modelli presi in considerazione.
 - ◆ In secondo luogo, sono stati quantificati i parametri necessari al tracciamento delle fasce d'ingombro associate a qualunque angolo di deviazione compreso tra 60° e 120° , in relazione a tutte le tipologie veicolari appartenenti alle classi prese in esame.

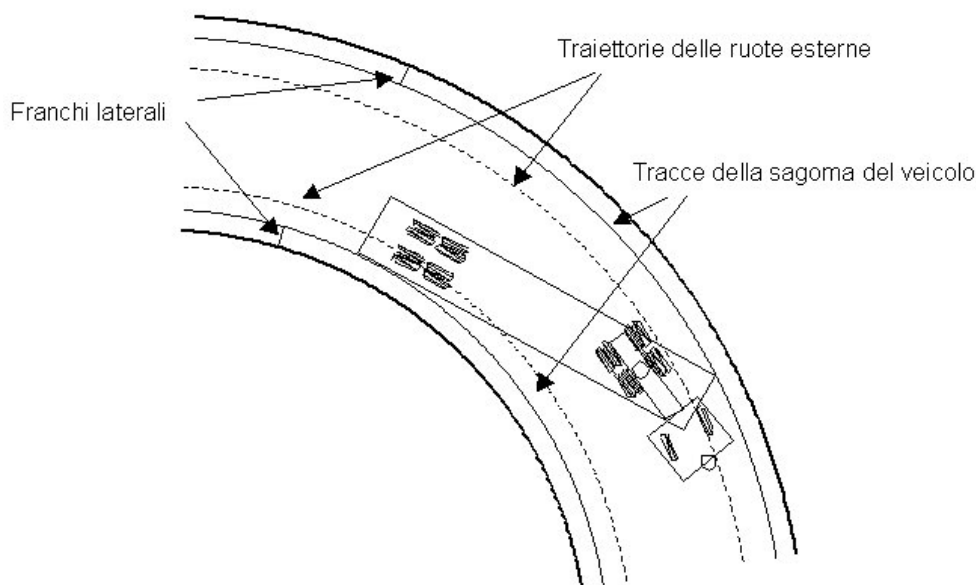


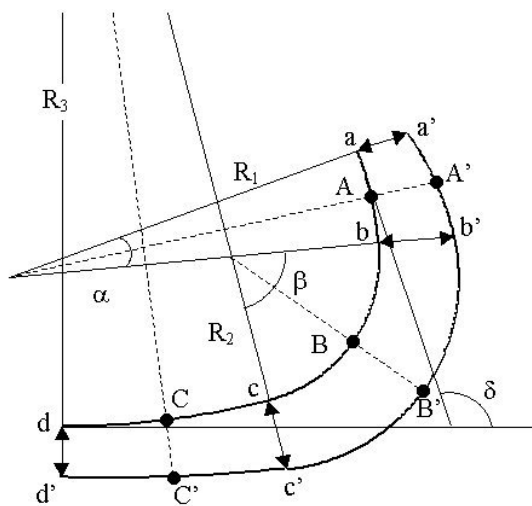
Figura 22 – Esempio di fascia d'ingombro relativa ad un autoarticolato.

In definitiva, i parametri che è stato possibile dedurre dall'analisi ragionata dai dati di output ottenuti sono i seguenti:

- il raggio R_2 della curva centrale della tricentrica;
- lo scostamento ΔR_1 tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_1 che funge da bisettrice dell'angolo α ;
- lo scostamento ΔR_2 tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_2 che funge da bisettrice dell'angolo β ;
- lo scostamento ΔR_3 tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_3 che funge da bisettrice dell'angolo γ ;
- lo scostamento ΔR_{11} tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_1 ortogonale al rettilineo di attacco della curva tricentrica;
- lo scostamento ΔR_{21} tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_2 che individua il punto di partenza dell'arco avente angolo di apertura pari a β ;
- lo scostamento ΔR_{23} tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_2 che definisce il punto finale dell'arco di mezzo della tricentrica (avente angolo di apertura pari a β);
- lo scostamento ΔR_{33} tra la curva di ciglio e la curva interna, valutato in corrispondenza del raggio R_3 ortogonale al rettilineo finale raccordato dall'ultimo tratto della curva tricentrica;

Si ribadisce poi che i valori dei raggi R_1 ed R_3 e quelli dei tre angoli (α , β e γ), sono stati ricavati in base alle direttive fornite dalla Normativa CNR.

La figura 23 evidenzia tutte le grandezze necessarie al corretto tracciamento della fascia d'ingombro, così come sono state dedotte a conclusione dell'iter procedurale esposto nel contesto del presente contributo.



Parametri per la definizione della fascia d'ingombro	
$AA' = \Delta R_1$	$aa' = \Delta R_{11}$
$BB' = \Delta R_2$	$bb' = \Delta R_{21}$
$CC' = \Delta R_3$	$cc' = \Delta R_{23}$
	$dd' = \Delta R_{33}$

Figura 23 – Grandezze geometriche necessarie per il tracciamento delle fasce d'ingombro dei veicoli in svolta sulle intersezioni a raso.

Nella tabella 8 sono stati riportati i parametri che, per ogni angolo di deviazione (δ), permettono il tracciamento

delle curve di ciglio e delle relative fasce d'ingombro associate ai diversi veicoli di progetto.

Veicolo di progetto	Angolo di deviazione δ		Parametri della tricentrica asimmetrica								
			R ₁ [m]	R ₂ [m]	R ₃ [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_2 [m]	ΔR_3 [m]	ΔR_{21} [m]	ΔR_{23} [m]	$\Delta R_{11} = \Delta R_{33}$ [m]
Veicolo leggero	60°	$\alpha = 8^\circ,00$	30	12	66	3,33	3,76	3,18	3,55	3,47	3.0
Autocarro		$\beta = 44^\circ,00$	42,5	17	93,5	4,07	4,84	3,79	4,46	4,31	3.5
Bus		$\gamma = 8^\circ,00$	42,5	17	93,5	4,07	4,84	3,79	4,46	4,31	3.5
Autoarticolato			57,5	23	126,5	4,49	5,90	3,98	5,19	4,94	3.5
Veicolo leggero	65°	$\alpha = 8^\circ,67$	27,5	11	60,5	3,36	3,82	3,19	3,59	3,51	3.0
Autocarro		$\beta = 47^\circ,67$	40	16	88	4,10	4,93	3,80	4,51	4,36	3.5
Bus		$\gamma = 8^\circ,67$	40	16	88	4,10	4,93	3,80	4,51	4,36	3.5
Autoarticolato			52,5	21	115,5	4,58	6,12	4,02	5,35	5,07	3.5
Veicolo leggero	70°	$\alpha = 9^\circ,33$	25	10	55	3,39	3,90	3,20	3,65	3,55	3.0
Autocarro		$\beta = 51^\circ,33$	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	4,58	4,42	3.5
Bus		$\gamma = 9^\circ,33$	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	4,58	4,42	3.5
Autoarticolato			45	18	99	4,75	6,55	4,10	5,65	5,32	3.5
Veicolo leggero	75°	$\alpha = 10^\circ,00$	22,5	9	49,5	3,43	3,99	3,22	3,71	3,61	3.0
Autocarro		$\beta = 55^\circ,00$	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	4,58	4,42	3.5
Bus		$\gamma = 10^\circ,00$	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	4,58	4,42	3.5
Autoarticolato			45	18	99	4,75	6,55	4,10	5,65	5,32	3.5
Veicolo leggero	80°	$\alpha = 10^\circ,67$	22,5	9	49,5	3,43	3,99	3,22	3,71	3,61	3.0
Autocarro		$\beta = 58^\circ,67$	35	14	77	4,18	5,12	3,84	4,65	4,48	3.5
Bus		$\gamma = 10^\circ,67$	35	14	77	4,18	5,12	3,84	4,65	4,48	3.5
Autoarticolato			42,5	17	93,5	4,82	6,73	4,13	5,77	5,43	3.5
Veicolo leggero	85°	$\alpha = 11^\circ,33$	20	8	44	3,48	4,11	3,24	3,79	3,68	3.0
Autocarro		$\beta = 65^\circ,33$	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	4,73	4,55	3.5
Bus		$\gamma = 11^\circ,33$	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	4,73	4,55	3.5
Autoarticolato			40	16	88	4,90	6,93	4,16	5,91	5,54	3.5
Veicolo leggero	90°	$\alpha = 12^\circ,00$	20	8	44	3,48	4,11	3,24	3,79	3,68	3.0
Autocarro		$\beta = 66^\circ,00$	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	4,73	4,55	3.5
Bus		$\gamma = 12^\circ,00$	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	4,73	4,55	3.5
Autoarticolato			37,5	15	82,5	5,00	7,15	4,20	6,07	5,68	3.5
Veicolo leggero	95°	$\alpha = 12^\circ,67$	17,5	7	38,5	3,54	4,26	3,27	3,90	3,77	3.0
Autocarro		$\beta = 69^\circ,67$	30	12	66	4,28	5,38	3,88	4,83	4,63	3.5
Bus		$\gamma = 12^\circ,67$	30	12	66	4,28	5,38	3,88	4,83	4,63	3.5
Autoarticolato			35	14	77	5,09	7,41	4,25	6,25	5,83	3.5
Veicolo leggero	100°	$\alpha = 13^\circ,33$	15	6	33	3,62	4,47	3,31	4,04	3,90	3.0
Autocarro		$\beta = 73^\circ,33$	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	4,95	4,73	3.5
Bus		$\gamma = 13^\circ,33$	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	4,95	4,73	3.5
Autoarticolato			32,5	13	71,5	5,21	7,70	4,31	6,46	6,00	3.5
Veicolo leggero	105°	$\alpha = 14^\circ,00$	15	6	33	3,62	4,47	3,31	4,04	3,90	3.0
Autocarro		$\beta = 77^\circ,00$	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	4,95	4,73	3.5
Bus		$\gamma = 14^\circ,00$	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	4,95	4,73	3.5
Autoarticolato			30	12	66	5,35	8,05	4,37	6,70	6,21	3.5
Veicolo leggero	110°	$\alpha = 14^\circ,67$	15	6	33	3,62	4,47	3,31	4,04	3,90	3.0
Autocarro		$\beta = 80^\circ,67$	25	10	55	4,43	5,75	3,95	5,09	4,85	3.5
Bus		$\gamma = 14^\circ,67$	25	10	55	4,43	5,75	3,95	5,09	4,85	3.5
Autoarticolato			30	12	66	5,35	8,05	4,37	6,70	6,21	3.5
Veicolo leggero	115°	$\alpha = 15^\circ,33$	12,5	5	27,5	3,73	4,75	3,36	4,24	4,05	3.0
Autocarro		$\beta = 84^\circ,33$	25	10	55	4,43	5,75	3,95	5,09	4,85	3.5
Bus		$\gamma = 15^\circ,33$	25	10	55	4,43	5,75	3,95	5,09	4,85	3.5
Autoarticolato			27,5	11	60,5	5,51	8,46	4,44	6,99	6,45	3.5
Veicolo leggero	120°	$\alpha = 16^\circ,00$	12,5	5	27,5	3,73	4,75	3,36	4,24	4,05	3.0
Autocarro		$\beta = 88^\circ,00$	22,5	9	49,5	4,53	6,00	3,99	5,26	5,00	3.5
Bus		$\gamma = 16^\circ,00$	22,5	9	49,5	4,53	6,00	3,99	5,26	5,00	3.5
Autoarticolato			27,5	11	60,5	5,51	8,46	4,44	6,99	6,45	3.5

Tabella 8 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio (Procedura elaborata).

A titolo d'esempio sono state tracciate tre curve di ciglio e le relative fasce d'ingombro (Fig. 24, Fig. 25 e Fig. 26), nel caso di tre diversi angoli di deviazione dei cigli (60°, 90°, 110°) e per tre veicoli di progetto (veicolo leggero, autocarro, autoarticolato).

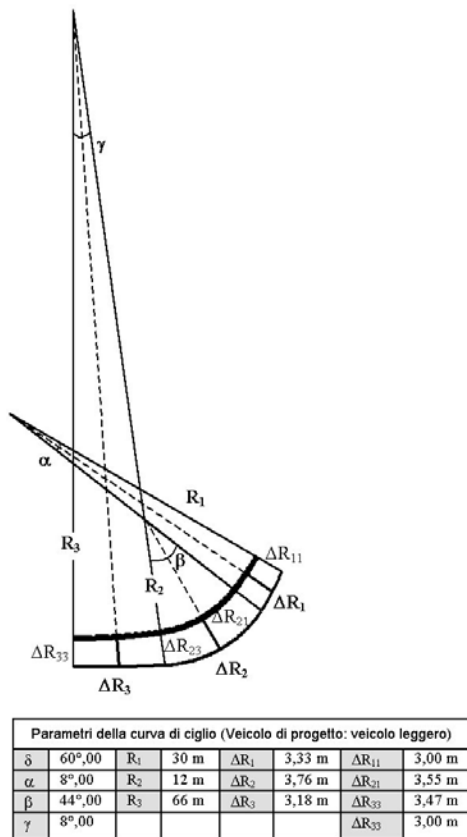


Figura 24 – Esempio di tricentrica di ciglio e fascia d'ingombro.

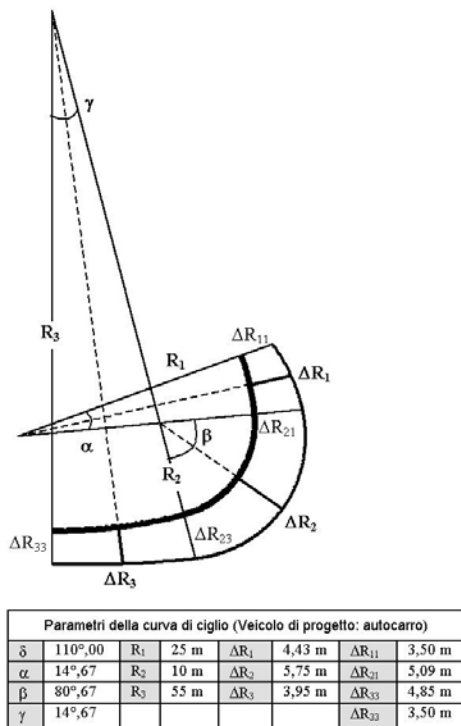


Figura 25 – Esempio di tricentrica di ciglio e fascia d'ingombro.

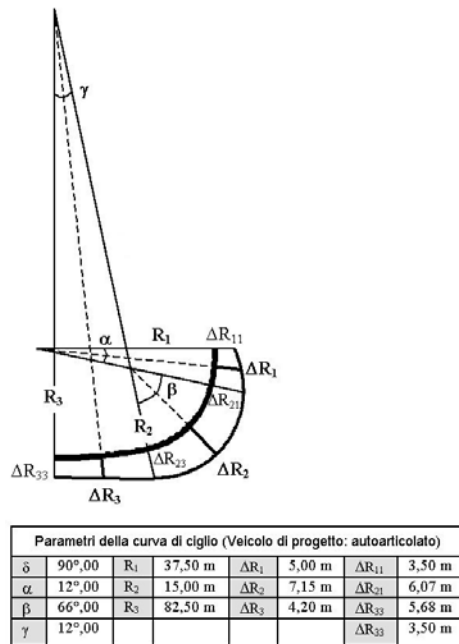


Figura 26 – Esempio di tricentrica di ciglio e fascia d'ingombro.

6. PROPOSTE DI ADEGUAMENTO DELLA NORMATIVA

Ai fini di pervenire, infine, ad una proposta di revisione della Normativa relativa ai criteri di progettazione delle intersezioni a raso in ambito urbano, con specifico riferimento alle indicazioni per il tracciamento delle curve di ciglio, si è scelto di compiere un “processo aggregativo”. In pratica, si sono associate alle tre tipologie di strade urbane per le quali il Nuovo Codice della Strada permette la possibilità di intersezioni a raso (strade urbane di scorrimento, strade urbane di quartiere, strade urbane locali), i parametri di progetto legati alle categorie veicolari ammissibili sulle strade medesime.

Si ricorda, in proposito, che in base alle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” recentemente approvate (G.U. N° 3 – 4 Gennaio 2002) vengono definite le seguenti quattordici categorie di traffico, omogenee per caratteristiche ed esigenze funzionali:

1. *Pedoni.*
2. *Animali.*
3. *Veicoli a braccia e a trazione animale* (veicoli a braccia, veicoli a trazione animale, slitte).
4. *Velocipedi.*
5. *Ciclomotori* (ciclomotori, motocicli (< 150 cc), motorcarrozette (< 250 cc), motoveicoli con massa a vuoto \leq 400 kg, motoveicoli con massa tot. > 1,3 t).
6. *Autovetture* (motoveicoli con massa a vuoto > 400

kg, motoveicoli con massa tot. > 1300 kg, autovetture, autoveicoli ad uso promiscuo).

7. *Autobus* (autobus, autosnodati, filoveicoli).
8. *Autocarri* (autocarri, autocaravan, trattori stradali).
9. *Autotreni e Autoarticolati* (autotreni, autoarticolati, caravan, mezzi d'opera).
10. *Macchine operatrici* (macchine agricole, macchine operatrici).
11. *Veicoli su rotaia in sede promiscua*.
12. *Sosta di emergenza*.
13. *Sosta*.
14. *Accesso privato diretto*.

Le stesse Norme consentono, sia per le strade urbane di scorrimento che per le strade urbane di quartiere, la circolazione di tutte le categorie di traffico (salvo specifiche limitazioni) analizzate nel presente studio, ovvero:

- categoria 6: autovetture;
- categoria 7: autobus;
- categoria 8: autocarri;
- categoria 9: autotreni ed autoarticolati.

Nel caso, invece delle strade urbane locali, non è ammissibile il transito dei veicoli di categoria 9 (autotreni ed autoarticolati).

Alla luce delle considerazioni appena svolte, si riportano nelle tabelle 9, 10, 11 e 12, le indicazioni di progetto per le curve di ciglio e per le relative fasce d'ingombro, in relazione a quattro tipologie di infrastrutture stradali urbane (le tre alle quali si è fatto riferimento, più una caratterizzata dal divieto di transito per i mezzi pesanti). Si osserva che, nel caso delle strade urbane di scorrimento, si sono adottati valori dei raggi di svolta (R_2) incrementati del 75% rispetto a quelli necessari, al fine di mettere in conto la possibilità di svoltare a velocità maggiori e quindi più coerenti con quelle ammissibili per tali tipologie di infrastrutture (con l'incremento dei raggi del 75%, si garantisce che la svolta nella situazione più favorevole per le manovre (angolo di deviazione pari a 60°) possa avvenire alla velocità di 40 km/h). I valori degli scostamenti sono stati ricavati da considerazioni prettamente geometriche.

STRADE URBANE DI SCORRIMENTO													
Grandezze angolari				Raggi e scostamenti minimi della tricentrica asimmetrica									
δ	α	β	γ	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_2 [m]	ΔR_3 [m]	ΔR_{11} [m]	ΔR_{21} [m]	ΔR_{23} [m]	ΔR_{33} [m]
60°	8°,00	44°,00	8°,00	100	40	220	4,49	4,90	3,98	3,5	4,69	4,44	3,5
65°	8°,67	47°,67	8°,67	92,5	37	203,5	4,58	5,01	4,02	3,5	4,79	4,51	3,5
70°	9°,33	51°,33	9°,33	80	32	176	4,75	5,24	4,10	3,5	5,00	4,67	3,5
75°	10°,00	55°,00	10°,00	80	32	176	4,75	5,24	4,10	3,5	5,00	4,67	3,5
80°	10°,67	58°,67	10°,67	75	30	165	4,82	5,35	4,13	3,5	5,09	4,74	3,5
85°	11°,33	65°,33	11°,33	70	28	154	4,90	5,48	4,16	3,5	5,19	4,82	3,5
90°	12°,00	66°,00	12°,00	65	26	143	5,00	5,63	4,20	3,5	5,31	4,92	3,5
95°	12°,67	69°,67	12°,67	62,5	25	137,5	5,09	5,71	4,25	3,5	5,40	4,98	3,5
100°	13°,33	73°,33	13°,33	57,5	23	126,5	5,21	5,90	4,31	3,5	5,55	5,10	3,5
105°	14°,00	77°,00	14°,00	52,5	21	115,5	5,35	6,12	4,37	3,5	5,74	5,24	3,5
110°	14°,67	80°,67	14°,67	52,5	21	115,5	5,35	6,12	4,37	3,5	5,74	5,24	3,5
115°	15°,33	84°,33	15°,33	47,5	19	104,5	5,51	6,39	4,44	3,5	5,95	5,42	3,5
120°	16°,00	88°,00	16°,00	47,5	19	104,5	5,51	6,39	4,44	3,5	5,95	5,42	3,5

Tabella 9 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio nel caso di strade urbane di scorrimento (Proposta di adeguamento della normativa).

STRADE URBANE DI QUARTIERE													
Grandezze angolari				Raggi e scostamenti minimi della tricentrica asimmetrica									
δ	α	β	γ	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_2 [m]	ΔR_3 [m]	ΔR_{11} [m]	ΔR_{21} [m]	ΔR_{23} [m]	ΔR_{33} [m]
60°	8°,00	44°,00	8°,00	57,5	23	126,5	4,49	5,90	3,98	3,5	5,19	4,94	3,5
65°	8°,67	47°,67	8°,67	52,5	21	115,5	4,58	6,12	4,02	3,5	5,35	5,07	3,5
70°	9°,33	51°,33	9°,33	45	18	99	4,75	6,55	4,10	3,5	5,65	5,32	3,5
75°	10°,00	55°,00	10°,00	45	18	99	4,75	6,55	4,10	3,5	5,65	5,32	3,5
80°	10°,67	58°,67	10°,67	42,5	17	93,5	4,82	6,73	4,13	3,5	5,77	5,43	3,5
85°	11°,33	65°,33	11°,33	40	16	88	4,90	6,93	4,16	3,5	5,91	5,54	3,5
90°	12°,00	66°,00	12°,00	37,5	15	82,5	5,00	7,15	4,20	3,5	6,07	5,68	3,5
95°	12°,67	69°,67	12°,67	35	14	77	5,09	7,41	4,25	3,5	6,25	5,83	3,5
100°	13°,33	73°,33	13°,33	32,5	13	71,5	5,21	7,70	4,31	3,5	6,46	6,00	3,5
105°	14°,00	77°,00	14°,00	30	12	66	5,35	8,05	4,37	3,5	6,70	6,21	3,5
110°	14°,67	80°,67	14°,67	30	12	66	5,35	8,05	4,37	3,5	6,70	6,21	3,5
115°	15°,33	84°,33	15°,33	27,5	11	60,5	5,51	8,46	4,44	3,5	6,99	6,45	3,5
120°	16°,00	88°,00	16°,00	27,5	11	60,5	5,51	8,46	4,44	3,5	6,99	6,45	3,5

Tabella 10 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio nel caso di strade urbane di quartiere (Proposta di adeguamento della normativa).

STRADE URBANE LOCALI													
Grandezze angolari				Raggi e scostamenti minimi della tricentrica asimmetrica									
δ	α	β	γ	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_2 [m]	ΔR_3 [m]	ΔR_{11} [m]	ΔR_{21} [m]	ΔR_{23} [m]	ΔR_{33} [m]
60°	8°,00	44°,00	8°,00	42,5	17	93,5	4,07	4,84	3,79	3,5	4,46	4,31	3,5
65°	8°,67	47°,67	8°,67	40	16	88	4,10	4,93	3,80	3,5	4,51	4,36	3,5
70°	9°,33	51°,33	9°,33	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	3,5	4,58	4,42	3,5
75°	10°,00	55°,00	10°,00	37,5	15	82,5	4,14	5,02	3,82	3,5	4,58	4,42	3,5
80°	10°,67	58°,67	10°,67	35	14	77	4,18	5,12	3,84	3,5	4,65	4,48	3,5
85°	11°,33	65°,33	11°,33	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	3,5	4,73	4,55	3,5
90°	12°,00	66°,00	12°,00	32,5	13	71,5	4,23	5,24	3,86	3,5	4,73	4,55	3,5
95°	12°,67	69°,67	12°,67	30	12	66	4,28	5,38	3,88	3,5	4,83	4,63	3,5
100°	13°,33	73°,33	13°,33	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	3,5	4,95	4,73	3,5
105°	14°,00	77°,00	14°,00	27,5	11	60,5	4,35	5,55	3,91	3,5	4,95	4,73	3,5
110°	14°,67	80°,67	14°,67	25	10	55	4,43	5,75	3,95	3,5	5,09	4,85	3,5
115°	15°,33	84°,33	15°,33	25	10	55	4,43	5,75	3,95	3,5	5,09	4,85	3,5
120°	16°,00	88°,00	16°,00	22,5	9	49,5	4,53	6,00	3,99	3,5	5,26	5,00	3,5

Tabella 11 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio nel caso di strade urbane locali (Proposta di adeguamento della normativa).

STRADE URBANE DOVE È STATO SANCITO IL DIVIETO DI CIRCOLAZIONE DEI MEZZI PESANTI													
Grandezze angolari				Raggi e scostamenti minimi della tricentrica asimmetrica									
δ	α	β	γ	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	ΔR_1 [m]	ΔR_2 [m]	ΔR_3 [m]	ΔR_{11} [m]	ΔR_{21} [m]	ΔR_{23} [m]	ΔR_{33} [m]
60°	8°,00	44°,00	8°,00	30	12	66	3,33	3,76	3,18	3,0	3,55	3,47	3,0
65°	8°,67	47°,67	8°,67	27,5	11	60,5	3,36	3,82	3,19	3,0	3,59	3,51	3,0
70°	9°,33	51°,33	9°,33	25	10	55	3,39	3,90	3,20	3,0	3,65	3,55	3,0
75°	10°,00	55°,00	10°,00	22,5	9	49,5	3,43	3,99	3,22	3,0	3,71	3,61	3,0
80°	10°,67	58°,67	10°,67	22,5	9	49,5	3,43	3,99	3,22	3,0	3,71	3,61	3,0
85°	11°,33	65°,33	11°,33	20	8	44	3,48	4,11	3,24	3,0	3,79	3,68	3,0
90°	12°,00	66°,00	12°,00	20	8	44	3,48	4,11	3,24	3,0	3,79	3,68	3,0
95°	12°,67	69°,67	12°,67	17,5	7	38,5	3,54	4,26	3,27	3,0	3,90	3,77	3,0
100°	13°,33	73°,33	13°,33	15	6	33	3,62	4,47	3,31	3,0	4,04	3,90	3,0
105°	14°,00	77°,00	14°,00	15	6	33	3,62	4,47	3,31	3,0	4,04	3,90	3,0
110°	14°,67	80°,67	14°,67	15	6	33	3,62	4,47	3,31	3,0	4,04	3,90	3,0
115°	15°,33	84°,33	15°,33	12,5	5	27,5	3,73	4,75	3,36	3,0	4,24	4,05	3,0
120°	16°,00	88°,00	16°,00	12,5	5	27,5	3,73	4,75	3,36	3,0	4,24	4,05	3,0

Tabella 12 – Raggi di svolta minimi, raggi di raccordo e scostamenti delle curve di ciglio nel caso di strade urbane per le quali è stato disposto il divieto di transito dei mezzi pesanti (Proposta di adeguamento della normativa).

7. CONCLUSIONI

L'attuale normativa CNR sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane, propone l'utilizzo di curve tricentriche per il tracciamento dei cigli di svolta delle intersezioni a raso.

La critica fondamentale che può essere mossa riguarda il fatto che, a differenza di altre Normative internazionali, i criteri di progetto consigliati non prendano minimamente in considerazione la definizione della fascia d'ingombro impegnata dai veicoli in svolta.

Si ritiene che questa questione sia di importanza fondamentale per la definizione degli spazi di fruizione all'interno dell'intersezione. Infatti, se l'ingombro dei veicoli (soprattutto quello dei mezzi articolati o snodati) non è correttamente valutato, si possono verificare (e ciò nella realtà avviene non di rado) continue invasioni, da parte degli autoveicoli, degli altri elementi funzionali presenti nelle intersezioni (prevalentemente le isole direzionali pseudo-triangolari, le isole "a goccia", gli elementi di sostegno della segnaletica).

L'analisi delle Norme CNR rivela poi un'attenzione di certo non marcata verso le modalità di tracciamento

delle curve di ciglio per quelle intersezioni a T presentanti angoli di deviazione diversi da 90°. A tal proposito si può osservare come le Norme liquidino tale questione proponendo dei valori del raggio centrale della tricentrica, corrispondenti a soli tre angoli di deviazione ed in funzione delle tre possibili strade urbane (di scorrimento, di quartiere, locali).

Con il presente contributo si è voluto proporre una metodologia che, pur non stravolgendo le indicazioni delle Norme italiane (i rapporti tra angoli e raggi sono rimasti quelli consigliati), cerca di colmare le lacune di cui si è detto.

In particolare, grazie al supporto di un software di simulazione che ha consentito di "verificare" molteplici configurazioni geometriche, è stato possibile definire compiutamente tutti i parametri di progetto utili sia per la definizione delle fasce d'ingombro, sia per la caratterizzazione delle tricentriche asimmetriche in corrispondenza dei vari valori che possono essere assunti dagli angoli di deviazione dei cigli.

La ricerca, dunque, si inquadra nel filone delle problematiche inerenti alle intersezioni stradali. In tale contesto, il presente gruppo di ricerca sta già lavorando al fine

di giungere alla proposizione di ulteriori criteri di progettazione mirati all'ottimizzazione della geometria complessiva degli incroci. Nello specifico, si intende portare avanti lo studio della distribuzione degli spazi all'interno delle intersezioni al fine di dedurre il corretto posizionamento delle isole direzionali e degli elementi di arredo. In tale contesto, partendo da un iter procedurale analogo a quello affrontato nel presente studio, si analizzeranno le fasce d'ingombro determinate dalle traiettorie di svolta a sinistra, da cui dipendono, tra l'altro, i contorni delle isole direzionali del tipo "a goccia".

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] AASHTO – **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets** – Washington D.C. – 2000.
- [2] AASHTO – **Guide for maximum dimensions and weights of motorvehicle operations** – Washington D.C. – 1985.
- [3] **Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade** – G.U. N.3 – 4 Gennaio 2002.
- [4] Consiglio Nazionale delle Ricerche – **Istruzioni per la redazione di progetti di strade** – Bollettino Ufficiale N.77 – 1980.
- [5] Consiglio Nazionale delle Ricerche – **Norme sulle caratteristiche geometriche e di traffico delle intersezioni stradali urbane** – Bollettino Ufficiale N.90 – 1983.
- [6] Consiglio Nazionale delle Ricerche – **Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane** – Bollettino Ufficiale N.150 – 1992.
- [7] **Nuovo Codice della Strada e Regolamento di Esecuzione** – Ed. Simone – 1993
- [8] S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia – **Le intersezioni stradali** – Quaderno n°2 – Febbraio 1999 – AIIT (Associazione Italiana per l'Ingegneria del Traffico e dei Trasporti).
- [9] G. Da Rios – **Progetto di Intersezioni Stradali** – UTET Libreria – 1999.
- [10] P. Ferrari e F. Giannini – 1. **Ingegneria stradale – Geometria e progetto di strade** – ISEDI – 1998.
- [11] G. Genta – **Meccanica dell'autoveicolo** – Ed. Levrotto & Bella – 1993.
- [12] F. Giannini, F. La Camera, A. Marchionna – **Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti** – MASSON Editoriale SEA – 1993.
- [13] F. La Camera – **Il calcolo del progetto stradale** – La planimetria – MASSON Editoriale SEA – 1992.
- [14] A. Orlandi – **Meccanica dei Trasporti** – Pitagora Editrice Bologna – 1990.
- [15] B. L. Smith – **Accomodation of Trucks on the Highway: Safety in Design** – American Society of Civil Engineers – New York – 1988.
- [16] E. Zagatti, R. Zennaro, P. Pasqualetto – **L'assetto dell'autoveicolo** – Ed. Levrotto & Bella – 1994.

AUTORI

Sascia Canale - Professore straordinario di "Costruzioni di Strade Ferrovie ed Aeroporti" presso l'Università degli Studi di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti.

Salvatore Leonardi – Ricercatore in "Costruzioni di Strade Ferrovie ed Aeroporti" presso l'Università degli Studi di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti.

Giuseppina Pappalardo - Dottoranda in "Ingegneria delle Infrastrutture Viarie" presso l'Università degli Studi di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti.