



COSTRUZIONE DI STRADE

**ANDAMENTO ALTIMETRICO
DELL'ASSE STRADALE,
DIAGRAMMA DELLE VELOCITÀ
E COORDINAMENTO
PLANO - ALTIMETRICO**



ANDAMENTO ALTIMETRICO DELL'ASSE

Le pendenze massime adottabili per i diversi tipi di strada sono indicate nella tabella seguente:

TIPO DI STRADA		AMBITO URBANO	AMBITO EXTRAURBANO
AUTOSTRADA	A	6%	5%
EXTRAURBANA PRINCIPALE	B	-	6%
EXTRAURBANA SECONDARIA	C	-	7%
URBANA DI SCORRIMENTO	D	6%	-
URBANA DI QUARTIERE	E	8%	-
LOCALE	F	10%	10%



Possibile **incremento** rispetto ai valori in tabella se lo sviluppo della livelletta non penalizza la velocità e la qualità della circolazione: **+1%**.

Pendenza **Max** In **galleria**: 4%.

ANDAMENTO ALTIMETRICO DELL'ASSE

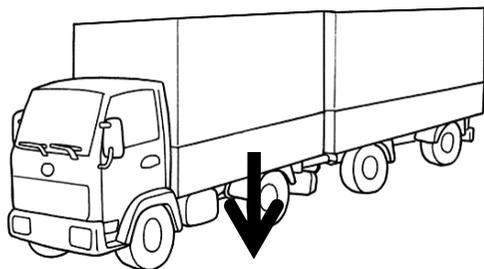
DETERMINAZIONE DELLA PENDENZA MASSIMA (con l'equazione del moto in condizioni limite)

VALORE
LIMITE
DELLA
FORZA DI
ADERENZA

$$P \cdot \alpha \cdot f_a = P \cdot w \pm P \cdot i + Cx \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \pm \frac{P}{g} (1 + \mu) \frac{dv}{dt}$$

Per moto uniforme di un mezzo pesante in condizioni limite con **v** bassa:

$$P \cdot \alpha \cdot f_a = P \cdot w \pm P \cdot i \rightarrow \alpha \cdot f_a = w + i$$



Veicolo condizionante: autotreno con
rimorchio ($\alpha = 0.25$)

Ipotizzando:

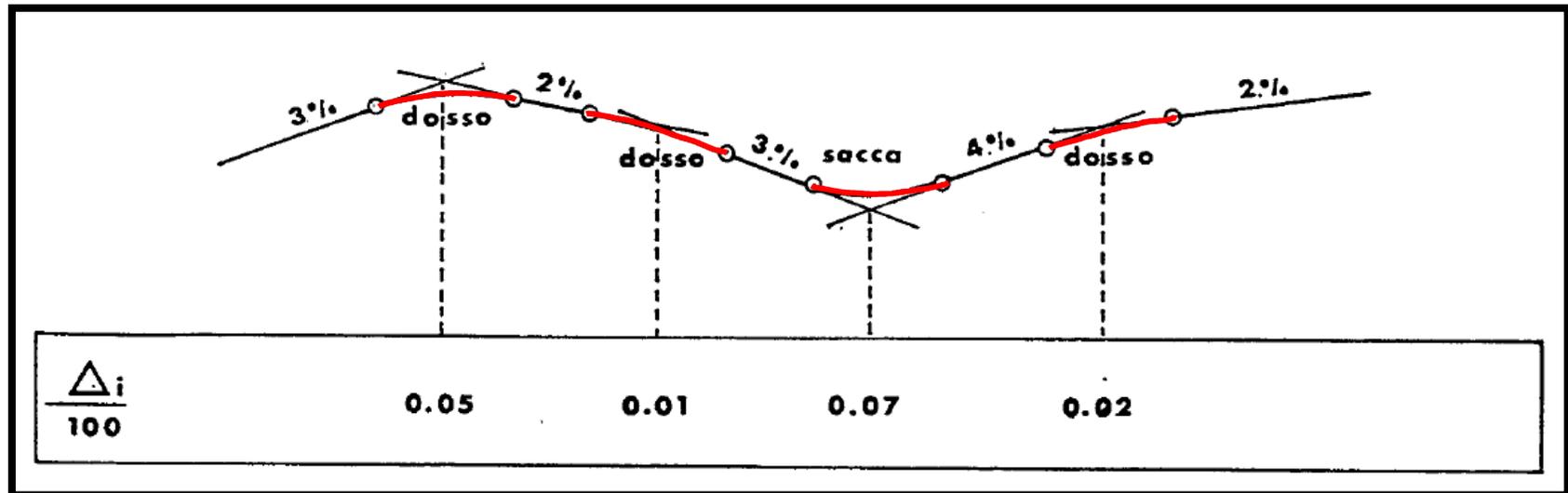
- $f_a = 0.30 \rightarrow (300 \text{ kg/t})$
- $w = 0.02 \rightarrow (20 \text{ kg/t})$

la pendenza massima $i_{MAX} = 5.5\%$

$$i = \alpha \cdot f_a - w$$

RACCORDI ALTIMETRICI

Il profilo altimetrico è costituito da tratti a pendenza costante, detti **livellette**, collegati da **raccordi verticali parabolici** convessi (**DOSSI**) e concavi (**SACCHE**):



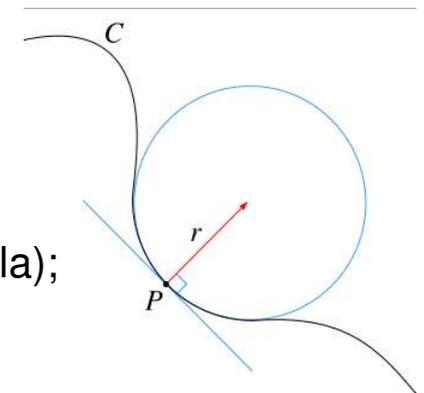
Raccordi: devono essere eseguiti con **archi di parabola quadratica ad asse verticale**, di lunghezza **L**

$$L = R_v \cdot \frac{\Delta i}{100} \quad [\text{m}]$$

R_v : raggio cerchio osculatore (stessa derivata I e II) nel vertice della parabola);

L: lunghezza del raccordo;

Δi : variaz. di pendenza, **espressa in %** (5% e non 0.05), delle livellette.



RACCORDI ALTIMETRICI

Equazione generale dell'arco di parabola passante per l'origine O.

$$y = bx - ax^2$$

$$y = \frac{i_2 - i_1}{100 \cdot 2L} \cdot x^2 + \frac{i_1}{100} \cdot x$$

I coefficienti a e b si ricavano imponendo

- tangenza della livelletta i_1 al raccordo nell'origine del riferimento cartesiano:

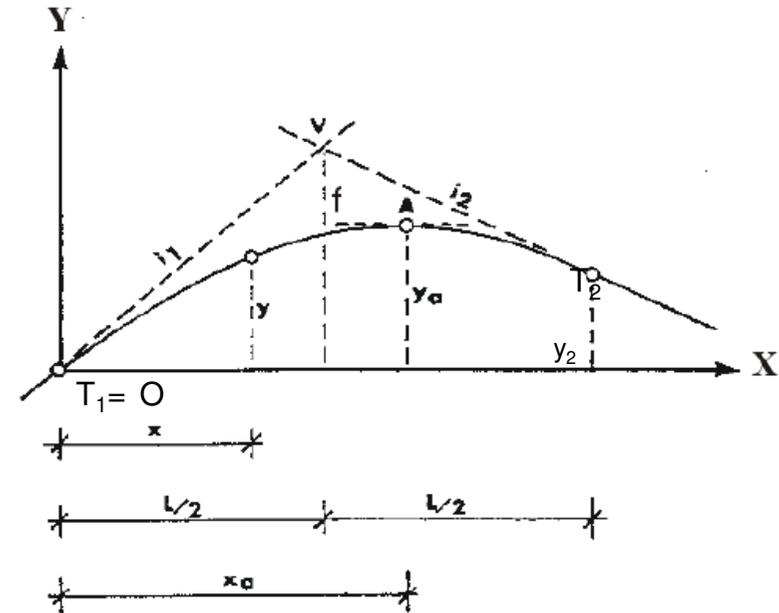


$$b = \frac{i_1}{100}$$

- tangenza della livelletta i_2 al raccordo nel punto $T_2=(L, y_2)$:



$$a = \frac{\Delta i}{100 \cdot 2L} = \frac{1}{2R_v}$$



RACCORDI ALTIMETRICI

Il valore minimo del raggio $R_{v \min}$, che definisce la lunghezza del raccordo, deve essere determinato in modo da garantire che:

1) nessuna parte del veicolo, eccetto le ruote, **abbia contatti** con la superficie stradale; ciò comporta:

$$\begin{array}{ll} \text{DOSSI} & \longrightarrow R_v \geq R_{v \min} = 20 \text{ m} \\ \text{SACCHE} & \longrightarrow R_v \geq R_{v \min} = 40 \text{ m} \end{array}$$

2) per il comfort dell'utenza l'**accelerazione verticale** a_v non superi il valore a_{\lim}

$$a_v = \frac{v_p^2}{R_v} \leq a_{\lim}$$

v_p = velocità di progetto della raccordo verticale [m/s], dal *diagramma delle velocità*
 R_v = raggio del raccordo verticale [m]
 $a_{\lim} = 0,6 \text{ m/s}^2$

3) vengano garantite le **visuali libere**.

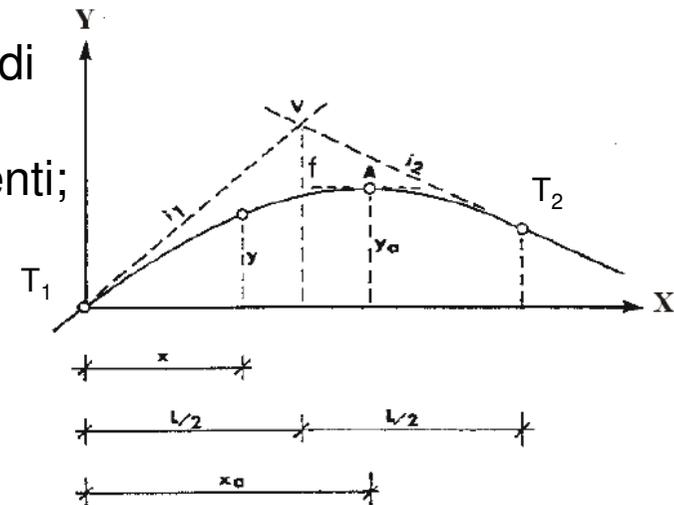
In pratica $R_v \gg R_{v \min}$ per la VISIBILITA' e la **corretta percezione ottica del tracciato**.

Con R_v elevati, in caso di sovrapposizione di **raccordi verticali e orizzontali**, si evita di percepire la **torsione dell'asse**.

RACCORDI ALTIMETRICI: Tracciamento

1. si misurano le **pendenze** i_1 e i_2 delle due livellette da raccordare;
2. si calcola la **variazione di pendenza totale** come: $\Delta i = |i_1 - i_2|$
3. si individua (criteri precedenti) il **raggio MINIMO** $R_{v \min}$ del cerchio osculatore (stessa derivata I e II) nel vertice della parabola;
4. si sceglie un raggio di progetto maggiorato $R_v \gg R_{v \min}$ e si calcola la **lunghezza** L del raccordo parabolico;
5. si individuano le posizioni dei **punti di tangenza** T_1 e di T_2 rispetto a V ;
6. Si posiziona il **sistema di riferimento cartesiano** con l'origine in T_1 ;
7. Si **divide l'intervallo** $0 \leq x \leq L$ in un certo numero (n) di segmenti, in funzione della precisione richiesta;
8. Si individuano le **ascisse** x_n all'estremità dei segmenti;
9. Si associa ad ogni punto di ascissa x_n la rispettiva **ordinata** y_n ;
10. Si traccia, infine, la **parabola** per i punti così individuati.

$$L = R_v \cdot \frac{\Delta i}{100}$$



RACCORDI VERTICALI CONVESSI - DOSSI

DISEGNO DEL RACCORDO

ESEMPIO

• Ipotizziamo: $L = 1.350 \text{ m}$

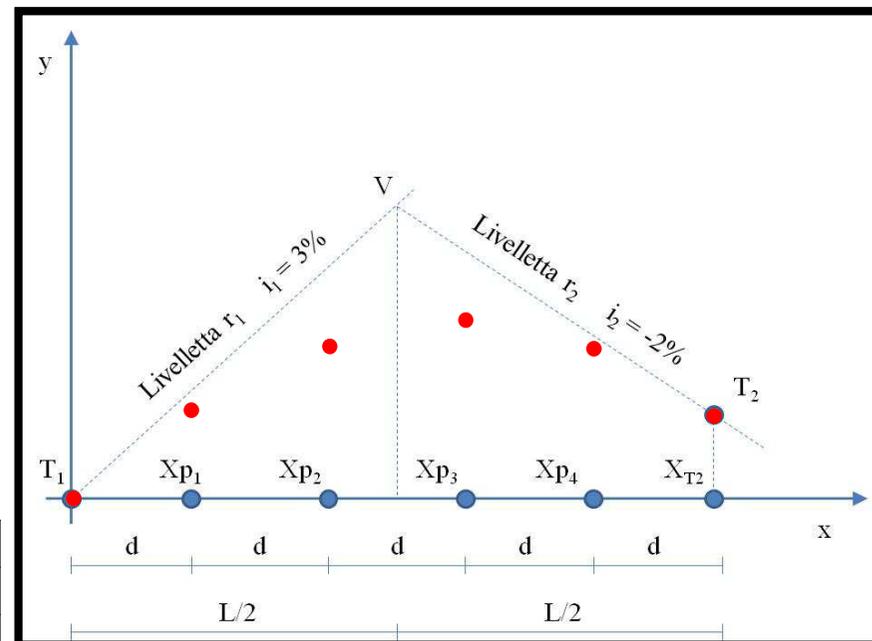
Ne deriva:

- Si individuano T_1 e T_2 simmetrici risp. a V ;
- Si **divide** l'intervallo $0 \leq x \leq L$ compreso tra T_1 e T_2 in un numero n di segmenti sufficienti a disegnare il raccordo (in figura $n=5$).
- Si associa, ad ogni ascissa x_n la corrispondente ordinata y_n per mezzo dell'equazione generale dei raccordi parabolici:

$$y = \frac{i_2 - i_1}{100 \cdot 2L} \cdot x^2 + \frac{i_1}{100} \cdot x$$

$$y = \frac{-2 - 3}{100 \cdot 2700} \cdot 270^2 + \frac{3}{100} \cdot 270$$

P.to	COORD. CARTESIANE	
	X (m)	Y(m)
T_1	0,00	0,00
1	270,00	6,75
2	540,00	10,80
3	810,00	12,15
4	1080,00	10,80
T_2	1350,00	6,75



RACCORDI VERTICALI CONCAVI - SACCHE

DISEGNO DEL RACCORDO

ESEMPIO

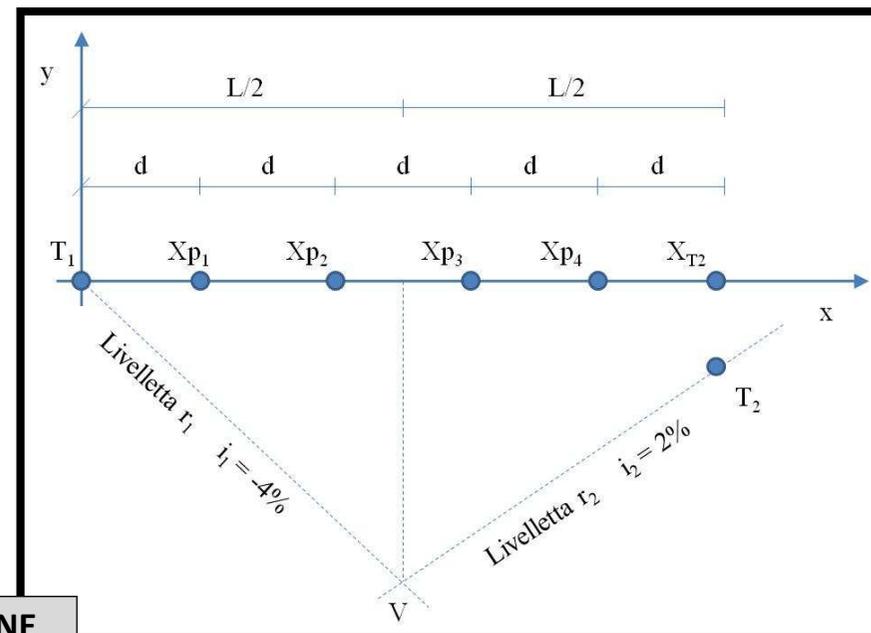
• Ipotizziamo: $L = 162$ [m]

Ne deriva:

- Si individuano T_1 e T_2 simmetrici risp. a V ;
- Il procedimento è quindi del tutto analogo a quanto visto per i dossi:
- $i_1 = -4\%$
- $i_2 = 2\%$
- $i_2 - i_1 = 6\%$

$$y = \frac{i_2 - i_1}{100 \cdot 2L} \cdot x^2 + \frac{i_1}{100} \cdot x$$

$$y = \frac{6}{100 \cdot 2 \cdot 162} \cdot x^2 + \frac{-4}{100} \cdot x$$



P.to	COORD. CARTESIANE	
	X (m)	Y(m)
T_1	0,00	0,00
1	32,40	-1,10
2	64,80	-1,81
3	97,20	-2,14
4	129,60	-2,07
T_2	162,00	-1,62

RACCORDI VERTICALI CONVESSI - DOSSI

R_v - CONDIZIONE DI VISIBILITA'

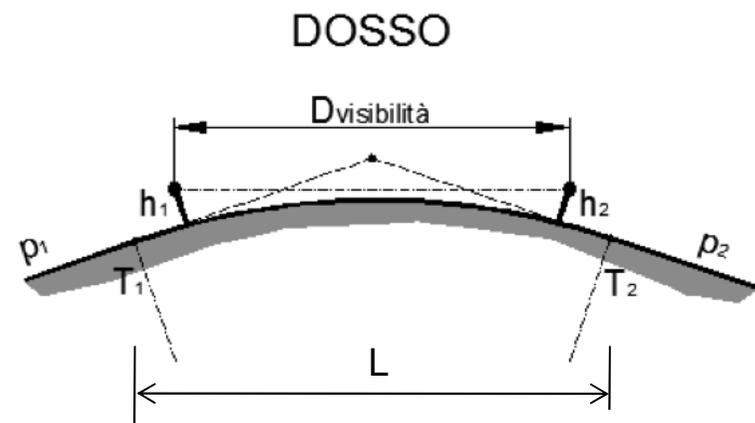
1. Si calcolano le **distanze di visibilità** per l'**arresto** (e ev. per il **sorpasso**), e di esse si considera la maggiore, che è denominata D .

L = lunghezza del raccordo parabolico [m];

D = distanza di visibilità da realizzare (arresto o sorpasso) [m];

h_1 = altezza sul piano stradale dell'occhio del conducente [m];

h_2 = altezza dell'ostacolo [m].



2. Confronto tra D ed L , dal quale può risultare $D > L$ o $D < L$ (caso in figura);
3. Verifica di R_v (raggio del raccordo convesso) con il **metodo analitico** o con il **metodo grafico** (abachi).

RACCORDI VERTICALI CONVESSI - DOSSIV

R_v - CONDIZIONE DI VISIBILITA' - ARRESTO

METODO GRAFICO:

$D < L$ o $D > L$

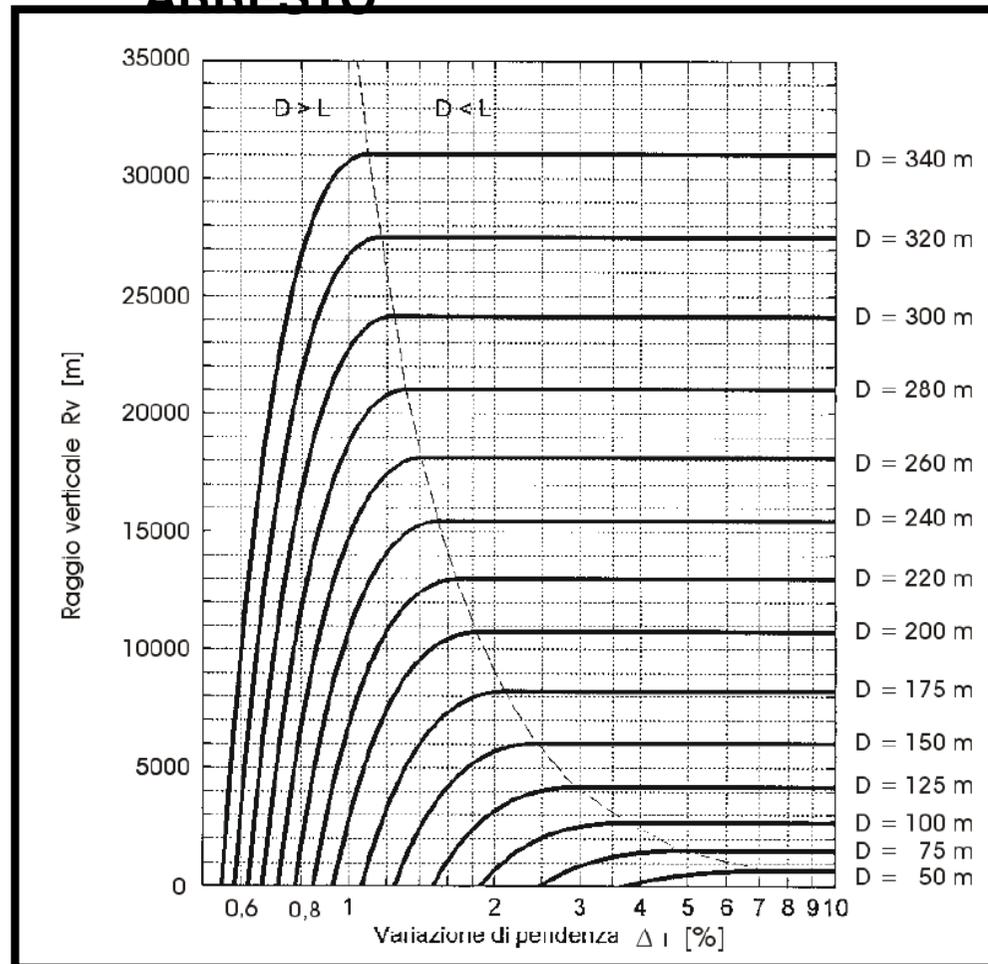
$h_1 = 1,10$ m

$h_2 = 0,10$ m

$\Delta i = \text{noto}$

R_v si ottiene
dall'abaco in figura.

La verifica può
essere fatta anche in
forma analitica



RACCORDI VERTICALI CONVESSI - DOSSI

R_v - CONDIZIONE DI VISIBILITA' - SORPASSO

METODO GRAFICO:

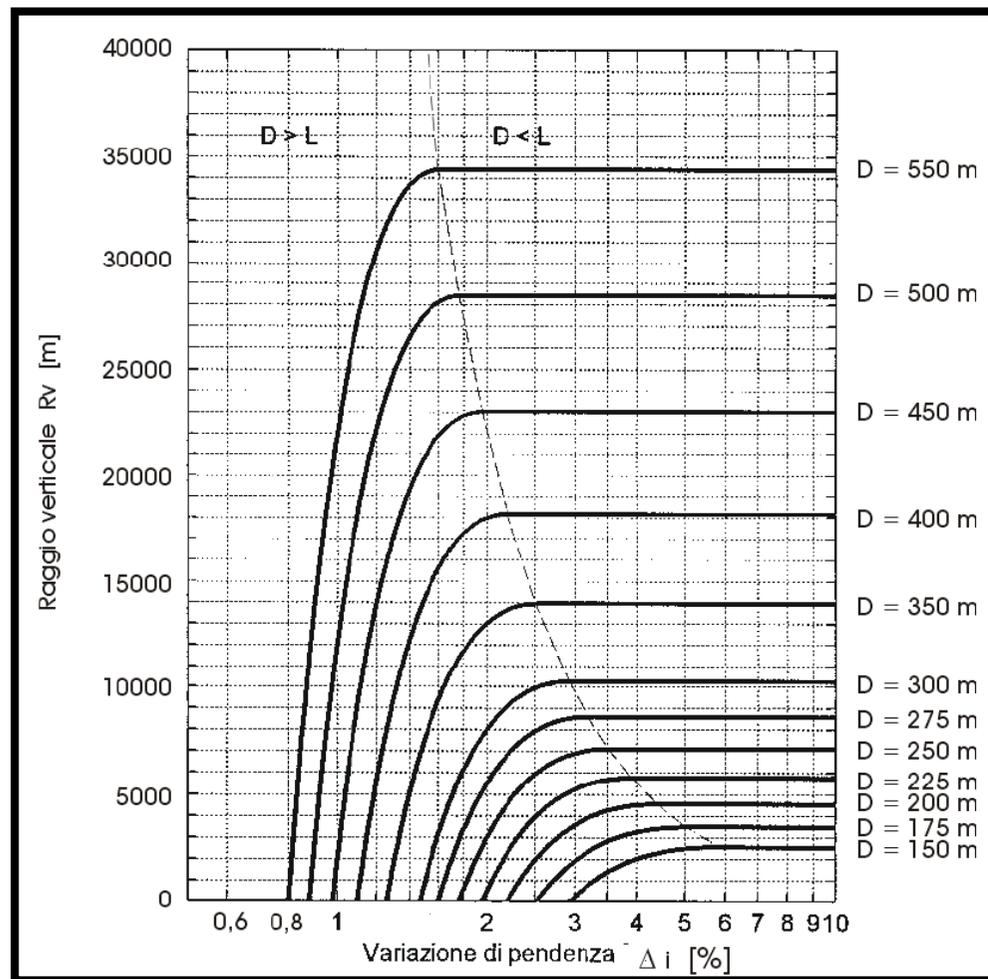
$D < L$ o $D > L$

$h_1 = 1,10$ m

$h_2 = 1,10$ m

$\Delta i = \text{noto}$

R_v si ottiene
dall'abaco in figura.



R_v - CONDIZIONE DI VISIBILITA'

Ore diurne: i **raccordi concavi** non creano problemi di visibilità.

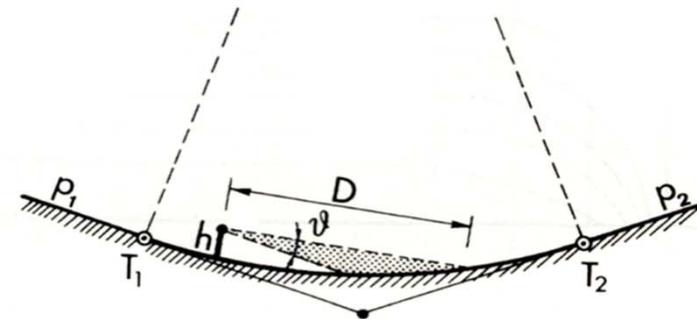
Ore notturne: si possono formare delle «**zone buie**» dipendenti da **geometria** del raccordo ed ampiezza del **fascio luminoso** proiettato dai veicoli.

1. Per la verifica di R_v (raccordo concavo) si considera come distanza di visibilità D quella necessaria **per l'arresto** di fronte ad un ostacolo fisso.

D = distanza di visibilità da realizzare (arresto);

$h = 0,5$ [m] altezza dei fari dal piano stradale;

$\theta = 1^\circ$ massima divergenza verso l'alto del fascio luminoso rispetto l'asse del veicolo.



1. Calcolo della **distanza di visibilità per l'arresto** $D = D_A$;
2. Confronto tra **D** ed **L**, dal quale può risultare $D > L$ o $D < L$;
3. Verifica di R_v con il **metodo analitico** o con il **metodo grafico** (abachi).

RACCORDI VERTICALI CONCAVI - SACCHE

R_v - CONDIZIONE DI VISIBILITA'

METODO GRAFICO:

$D < L$ o $D > L$

$h = 0,50$ m

$\vartheta = 1^\circ$

$\Delta i = \text{noto}$

R_v si ottiene dall'abaco in figura.

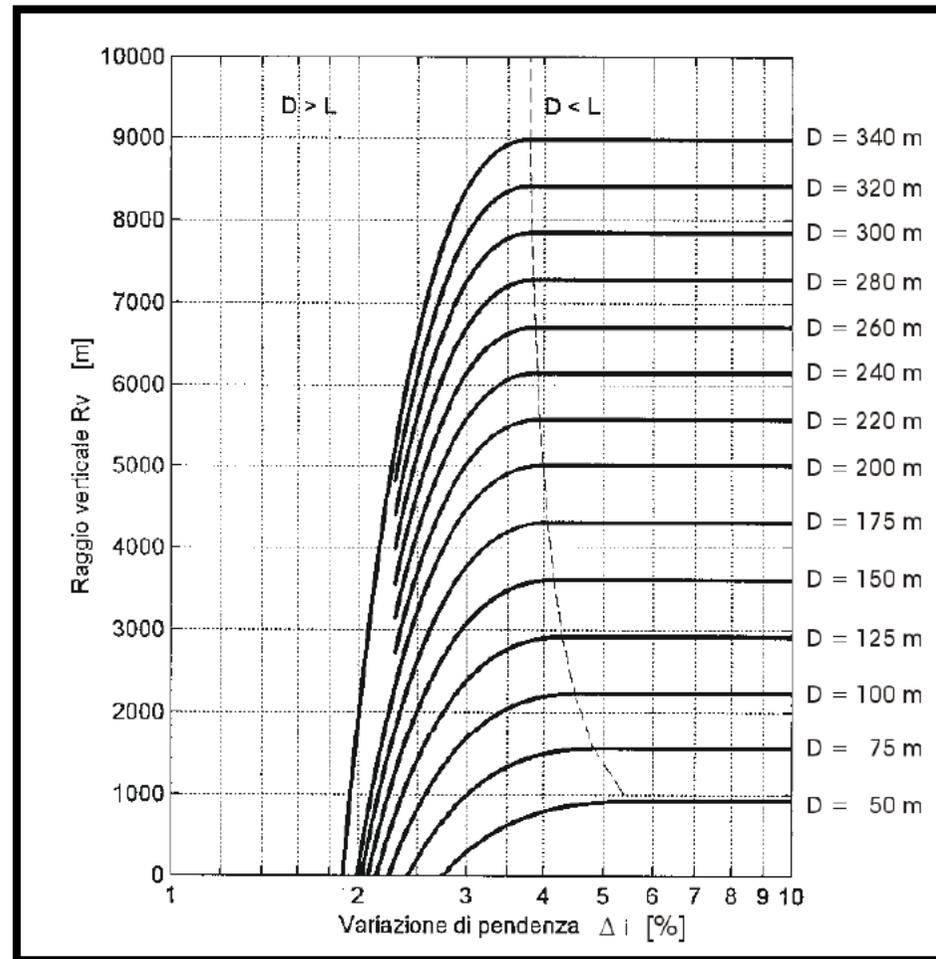


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – Principi generali

1. Rappresentazione grafica della **velocità di progetto** in funzione della **progressiva** dell'asse stradale.
2. Si considera il **solo tracciato planimetrico** (ipotesi: pendenze longitudinali non influenzano la velocità di progetto).
3. In ogni elemento (curve, rettili ecc.) la velocità di progetto deve essere contenuta nei limiti previsti dal DM 2001 per la categoria di strada.
4. modello semplificato di variazione della velocità lungo il tracciato:
 - la velocità è **costante** lungo tutto lo sviluppo delle **curve** con $R < R_{2,5}$:

$$V_P = \sqrt{127 \cdot (f_{t,\max}(V_P) + q_{\max}) \cdot R}$$

- in **rettili**, nelle **curve con $R \geq R_{2,5}$** , e nelle **clotoidi**, SE POSSIBILE, la velocità di progetto tende al limite superiore dell'intervallo;
- gli spazi di **accelerazione** dopo una curva circolare, e quelli di **decelerazione** prima di una curva, ricadono soltanto negli elementi D_i : rettilineo, curve ampie ($R > R_{2,5}$) e clotoidi;
- i valori dell'**accelerazione** e della **decelerazione** restano determinati in **0.8 m/s²**

DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – Definizioni

Lunghezza di transizione D_T : lunghezza in cui la velocità passa dal valore V_{p_i} al valore $V_{p_{i+1}}$ (velocità di progetto di due curve consecutive):

$$D_T = \frac{\Delta V \cdot V_m}{12.96 \cdot a}$$

ΔV = differenza di velocità ($V_{p_i} - V_{p_{i+1}}$) [km/h]

V_m = velocità media tra i due elementi [km/h]

a = accelerazione o decelerazione = ± 0.8 [m/s²]

Formula alternativa:

$$D_T = \frac{V_2^2 - V_1^2}{25.9 \cdot a}$$

Distanza di riconoscimento D_r : corrisponde alla "lunghezza massima del tratto di strada entro il quale il conducente può riconoscere eventuali ostacoli e avvenimenti" (ad esempio l'approssimarsi di una curva).

$$D_r = t \cdot v_p$$

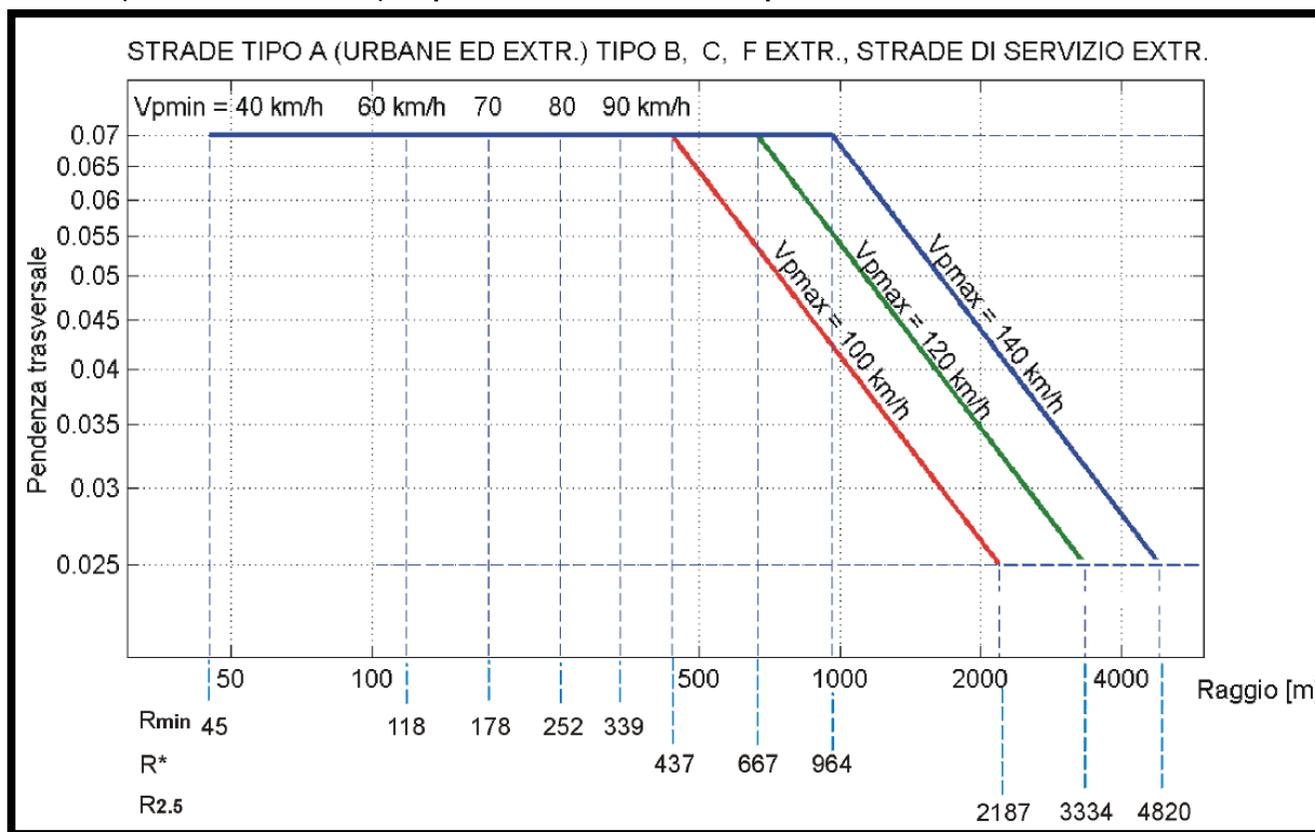
$t = 12$ [s]

v_p = vel. di progetto riferita all'elemento di raggio maggiore [m/s]

RICHIAMO: R_{\min} , R^* e $R_{2,5}$ delle CURVE CIRCOLARI

ESEMPIO STRADA TIPO A: (autostrada e.) V_p min. 90 km/h, V_p max. 140 km/h;

- $R_{\min} = 339$ m.
- $R^* = 964$ m
- $R_{2,5} = 4820$ m;



VELOCITÀ [km/h]	25	40	60	80	100	120	140
$f_{t,\max}$ per strade di tipo A, B, C, F extraurbane	-	0,21	0,17	0,13	0,11	0,10	0,09
$f_{t,\max}$ per strade di tipo D, E, F urbane	0,22	0,21	0,20	0,16	-	-	-

DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – Costruzione I Fase

ESEMPIO STRADA TIPO A: (autostrada e.) V_p min. 90 km/h, V_p max. 140 km/h;

- $R_{\min} = 339$ m.
- $R^* = 964$ m
- $R_{2.5} = 4820$ m;

1. si traccia il diagramma delle curvature ($1/R$): **rettifili** – clotoidi – **curve (8)**.
2. R ha segno +/- diverso per curve a dx e sx.

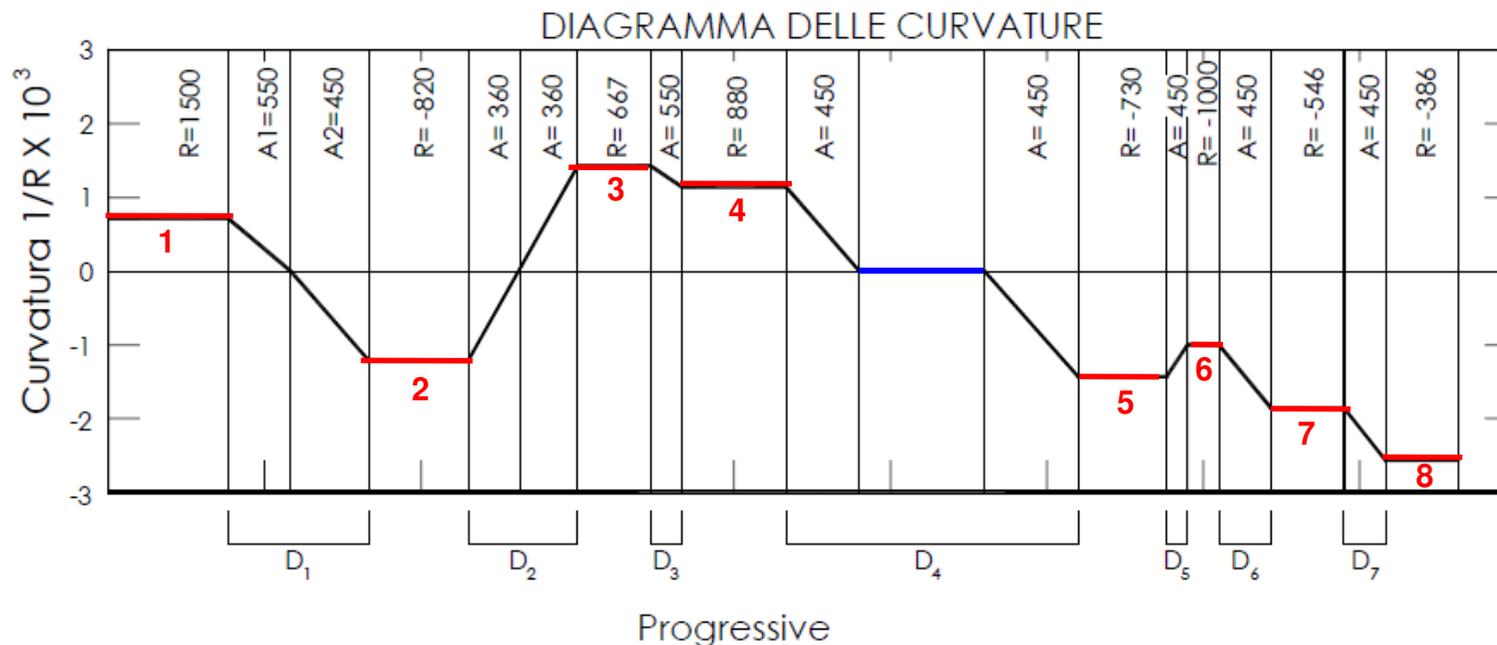


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – I FASE

2. per le 6 (di 8) curve con $R_{\min} \leq R \leq R^*$ si calcola la corrispondente velocità di progetto:

$$V_P = \sqrt{127 \cdot (f_{t,\max}(V_P) + q_{\max}) \cdot R}$$

3. si costruisce il corrispondente diagramma delle velocità di progetto di prima fase – **velocità nelle curve costante**.
4. restano individuati i punti di **inizio** delle manovre di accelerazione (○ - fine di una curva) e **fine** delle manovre di decelerazione (□ - inizio di una curva).
5. Tali manovre (accelerazione e decelerazione) saranno effettuate nei tratti D_i compresi tra due curve successive.

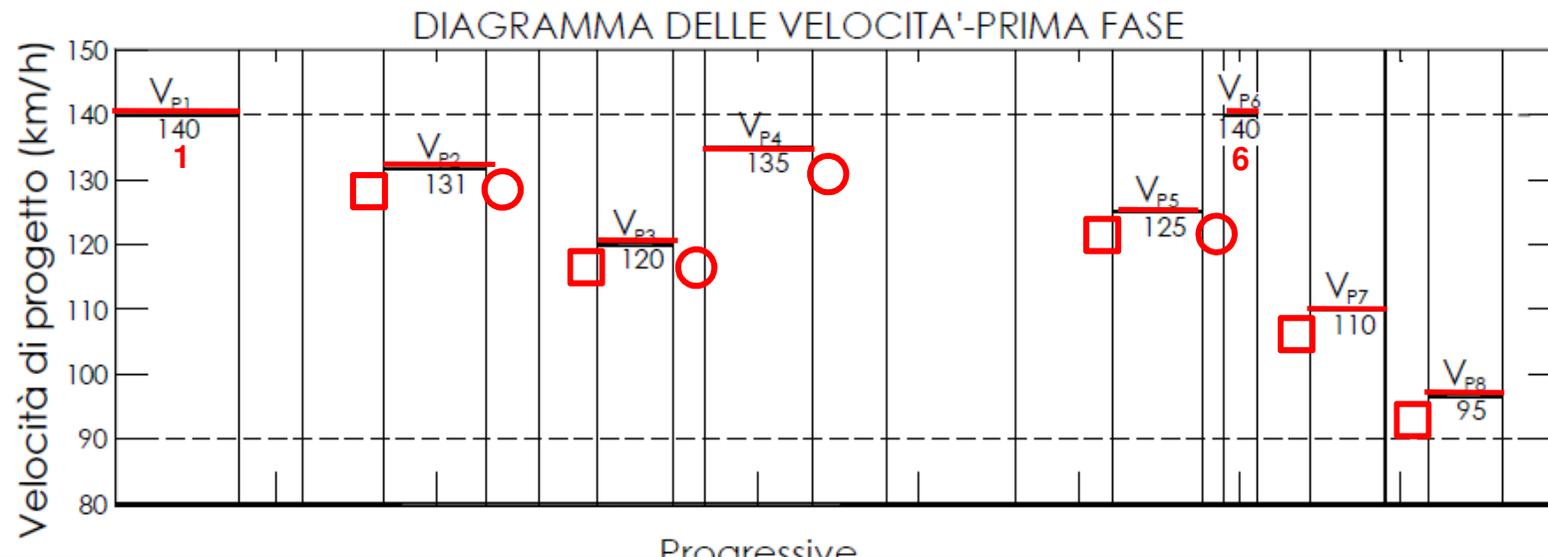


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' - I FASE

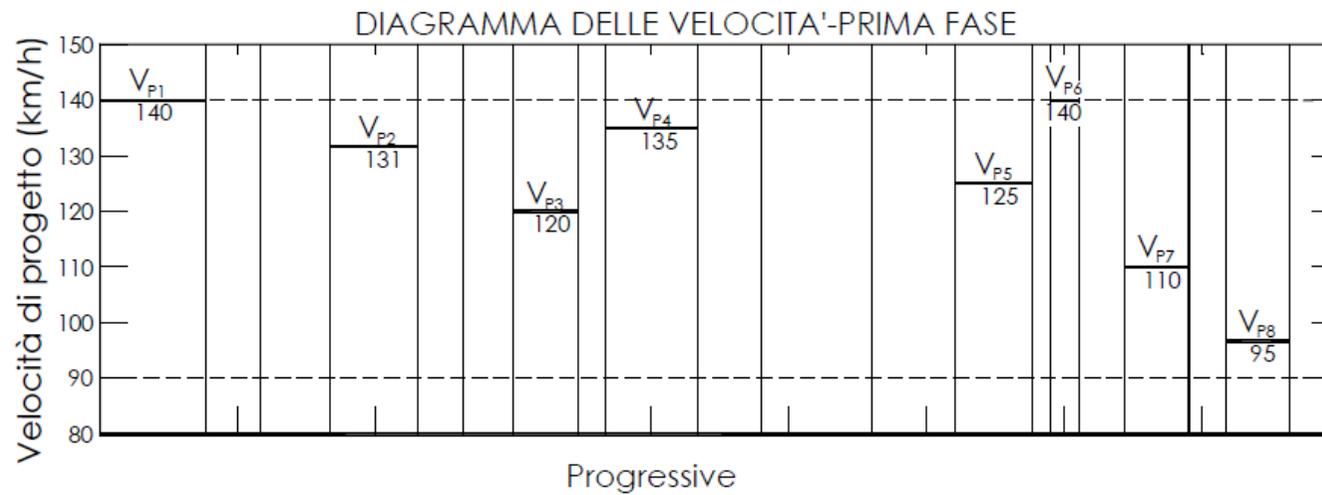
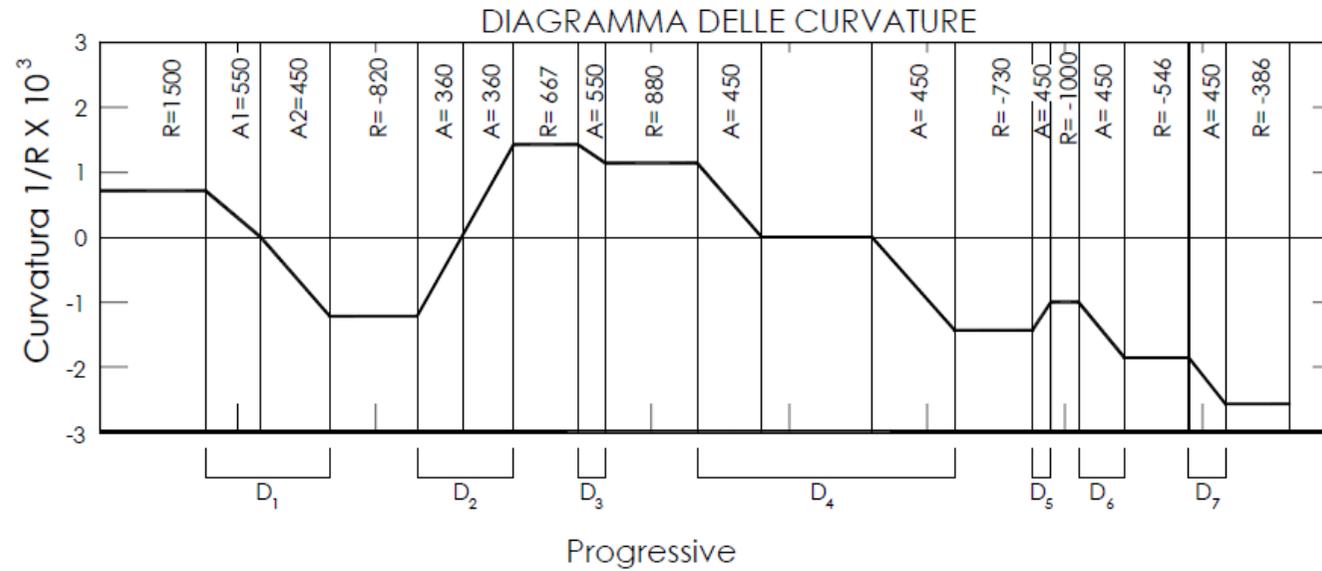


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – Costruzione II Fase

6. si raccordano le $V_{p,i}$ (delle curve) individuate nella Prima Fase con tratti a V_p variabile;
7. Si passa quindi alle verifiche di accettabilità del diagramma secondo criteri prestabiliti.

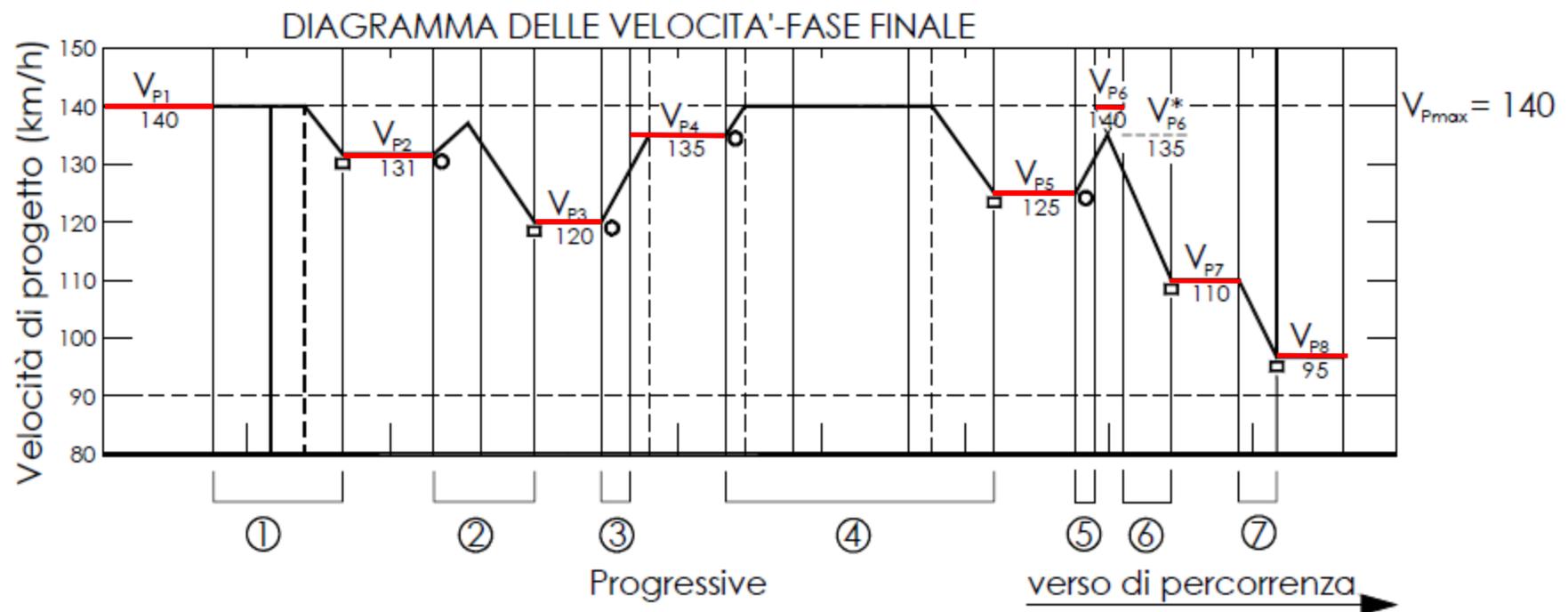


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' - I e II FASE

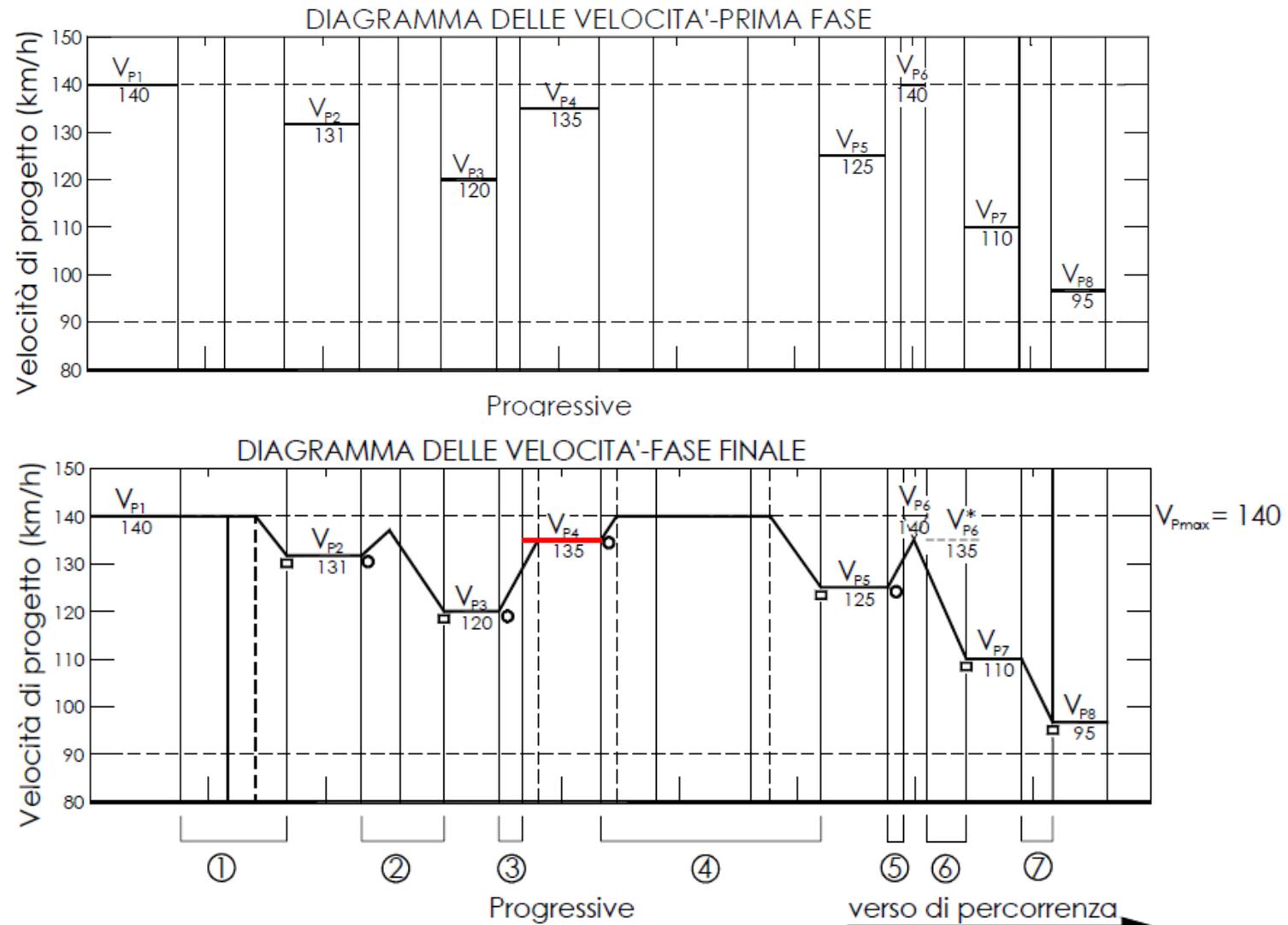


DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – II FASE Verifica delle lunghezze D

1. La **prima verifica** consiste nel controllare che $D_1, D_2, \dots, D_i \geq D_T$ (lunghezza di transizione) \rightarrow possibilità di eseguire le manovre.
2. poiché un cambiamento di curvatura del tracciato deve essere **percepito** dal conducente con adeguato anticipo in modo che possa adeguare la propria velocità, **in caso di decelerazioni**, la **lunghezza di transizione** (D_T) non deve essere superiore alla **distanza di riconoscimento** (D_r): $D_T \leq D_r$
3. Inoltre la **variazione di curvatura deve essere effettivamente visibile** e quindi deve risultare anche lungo il tracciato: $D_T \leq D_V$ (distanza di visuale libera nel tratto che precede la curva circolare).

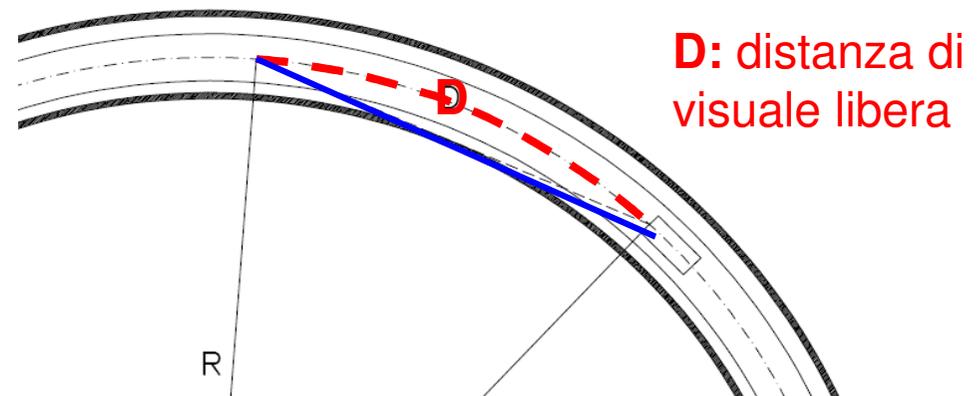


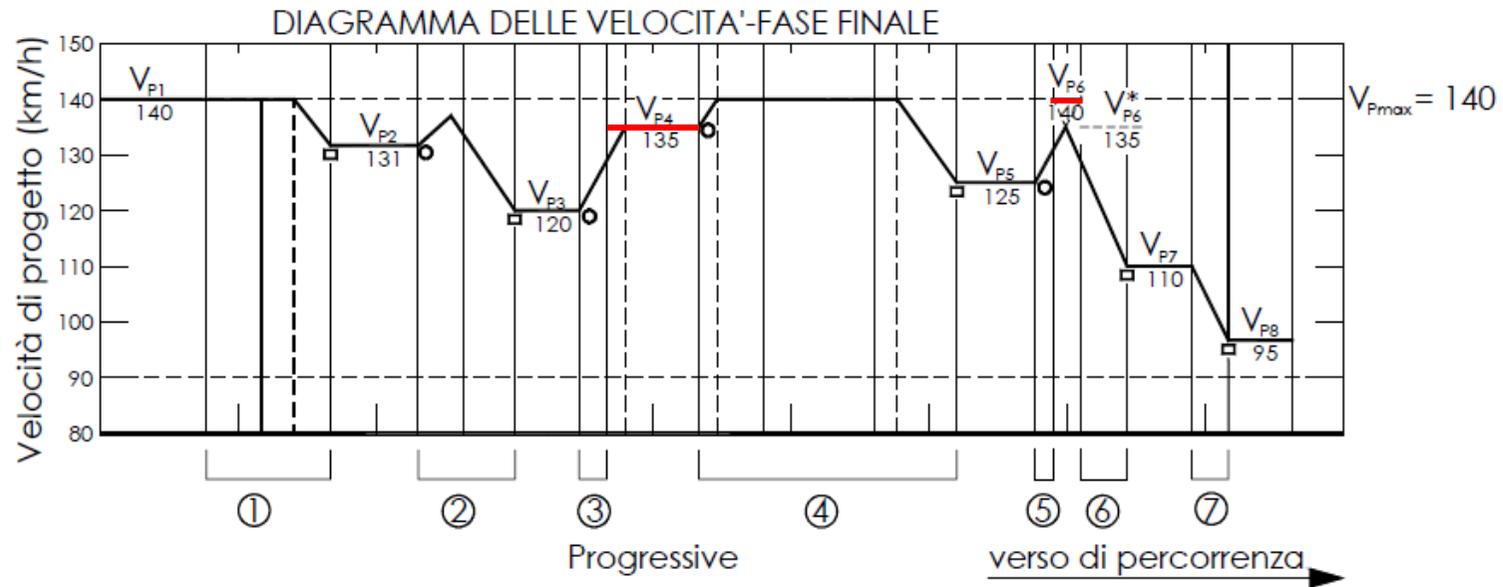
DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – II FASE Verifica dell'omogeneità

Per $V_{p_{max}} \geq 100$ km/h (autostrade, strade extraurbane principali e secondarie):

- nel passaggio da **tratti caratterizzati dalla $V_{p_{max}}$** a curve a velocità inferiore, la differenza di velocità di progetto non deve superare **10 km/h**;
- fra due **curve successive** tale differenza, comunque mai superiore a **20 km/h**, è consigliabile che non superi i 15 km/h.

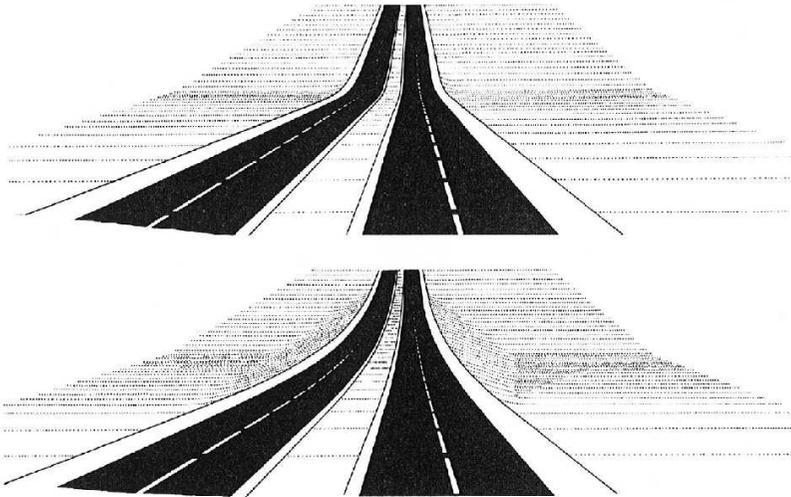
Per le altre Categorie stradali ($V_{p_{max}} \leq 80$ km/h) le limitazioni (vedi DM 2001) sono ancora più restrittive.

DIAGRAMMA DELLE VELOCITA' – II FASE



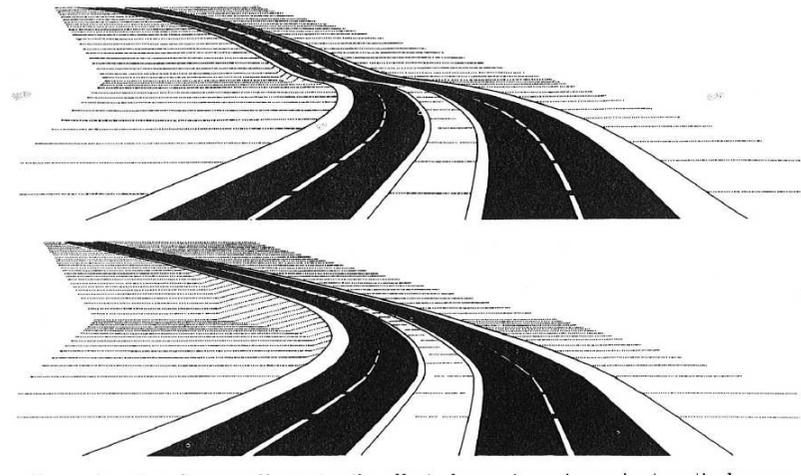
①	$V_{Pmax} = V_{P1} > V_{P2}$	$D_1 > D_T$	D_T lunghezza di transizione per decelerare da V_{P1} a V_{P2}	$V_{P1} - V_{P2} \leq 10$ accett.
②	$V_{Pmax} > V_{P2} > V_{P3}$	$D_2 > D_T$	D_T lunghezza di transizione per decelerare da V_{P2} a V_{P3}	$V_{P2} - V_{P3} \leq 20$ accett.
③	$V_{P3} < V_{P4} < V_{Pmax}$	$D_3 < D_T$	D_T lunghezza di transizione per accelerare da V_{P3} a V_{P4}	$V_{P4} - V_{P3} \leq 20$ accett.
④	$V_{Pmax} > V_{P4} > V_{P5}$	$D_4 > (D_{T4} + D_{T5})$	D_{T4} lunghezza di transizione per accelerare da V_{P4} a V_{Pmax} D_{T5} lunghezza di transizione per decelerare da V_{Pmax} a V_{P5}	$V_{P4} - V_{P5} \leq 20$ accett. $V_{Pmax} - V_{P5} > 10$ non acc.
⑤	$V_{P5} < V_{P6}^* < V_{Pmax}$	$D_5 < D_T$	D_T lunghezza di transizione per accelerare da V_{P5} a V_{Pmax}	$V_{P6}^* - V_{P5} \leq 20$ accett.
⑥	$V_{Pmax} > V_{P6}^* > V_{P7}$	$D_6 < D_T$	D_T lunghezza di transizione per decelerare da V_{Pmax} a V_{P7}	$V_{P6}^* - V_{P7} > 20$ non acc.
⑦	$V_{Pmax} > V_{P7} > V_{P8}$	$D_7 = D_T$	D_T lunghezza di transizione per decelerare da V_{P7} a V_{P8}	$V_{P7} - V_{P8} \leq 20$ accett.

piccole variazioni di pendenza
delle livellette



1

sovrapposizione di **raccordi verticali** e **orizzontali** (torsione dell'asse).



2

adottando $R_v \gg R_v \min$:

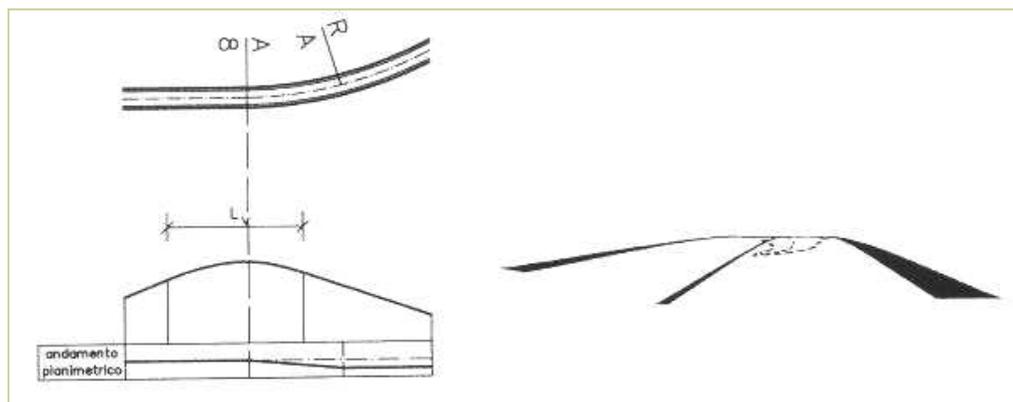
- i problemi illustrati non sussistono:
- migliora la **percezione ottica del tracciato**

COORDINAMENTO PLANO - ALTIMETRICO

DIFETTI DI COORDINAMENTO fra elementi planimetrici ed altimetrici

Occorre evitare che il **punto di inizio di una curva planimetrica coincida o sia prossimo con la sommità di un raccordo verticale convesso**. Se ciò si verifica, risulta mascherato il cambiamento di direzione in planimetria.

Un miglioramento del quadro prospettico lo si ottiene anticipando l'inizio dell'elemento curvilineo planimetrico quanto più possibile

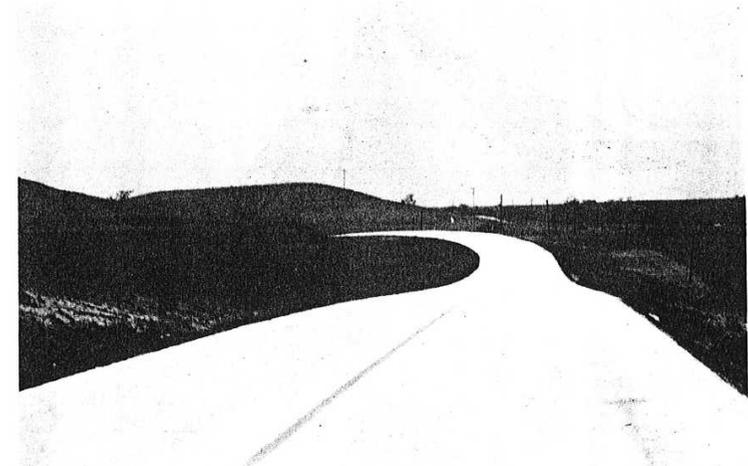
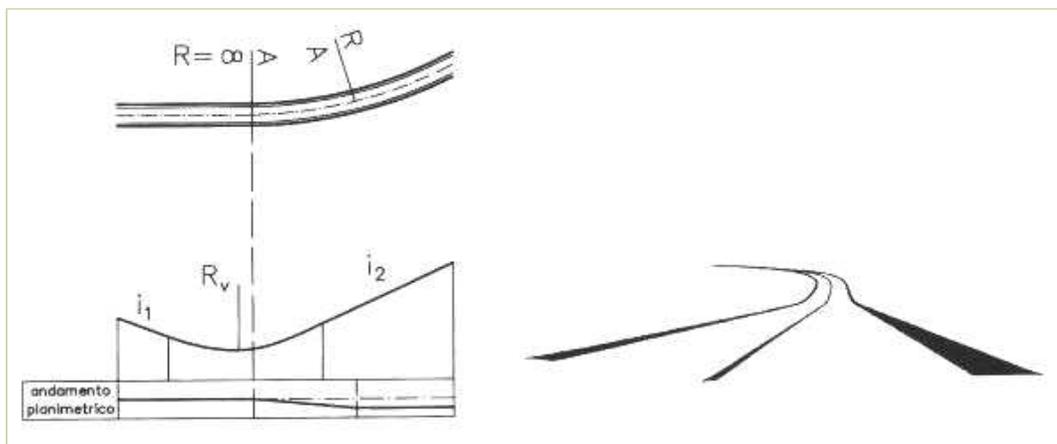


COORDINAMENTO PLANO - ALTIMETRICO

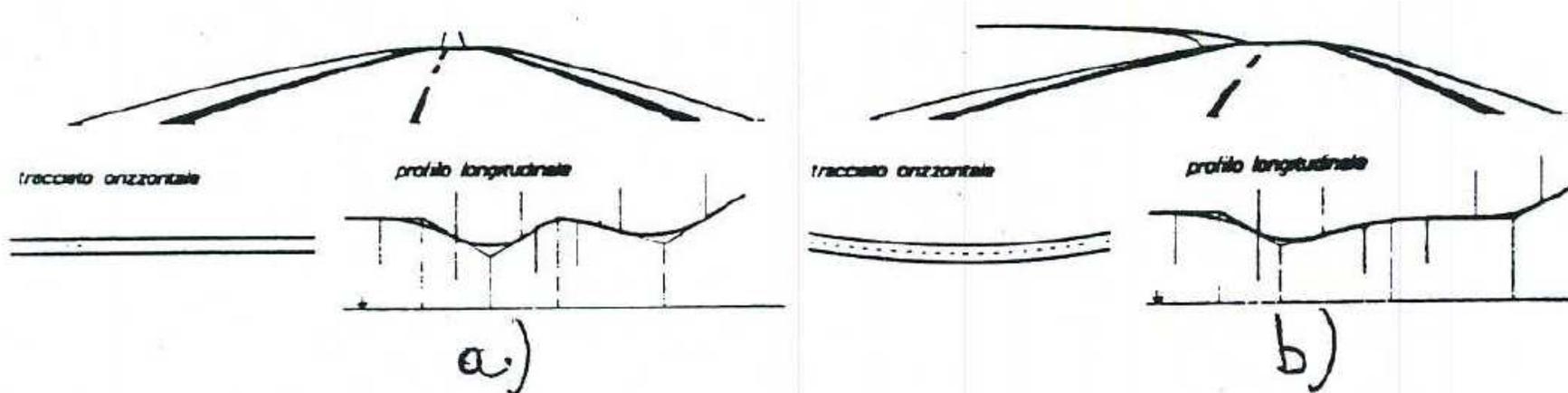
DIFETTI DI COORDINAMENTO fra elementi planimetrici ed altimetrici

Occorre evitare che un **raccordo planimetrico inizi immediatamente dopo un raccordo concavo**. Se ciò si verifica la visione prospettica dei cigli presenta una falsa piega.

Quando non sia possibile spostare i due elementi in modo che le posizioni dei rispettivi vertici coincidano, un miglioramento della qualità ottica del tracciato lo si ottiene imponendo che il rapporto fra il raggio verticale R_v ed il raggio della curva planimetrica R sia ≥ 6 .



PERDITA DI TRACCIATO: ESEMPI



Quando un raccordo concavo segue un raccordo convesso, nel quadro prospettico dell'utente può rimanere mascherato un tratto intermedio del tracciato. Si definisce questa situazione come "perdita di tracciato" vedi figure **a) in rettifilo** e **b) in curva**.

COORDINAMENTO PLANO - ALTIMETRICO

La “perdita di tracciato” **disorienta** quando il tracciato ricompare ad una distanza **inferiore** a quella riportata nella tabella seguente:

Velocità [km/h]	25	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Distanza di ricomparsa [m]	150	180	220	280	350	420	500	560	640	720	800	860

