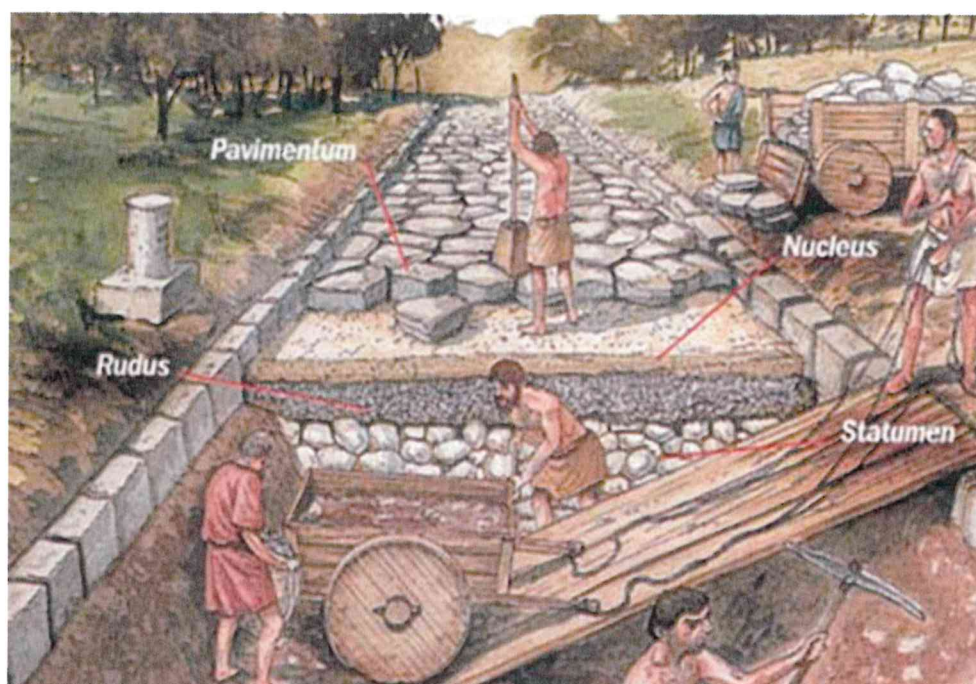


# Comune di Partinico

## Progetto Rotatoria del nodo d'interscambio



## CALCOLI E VERIFICHE PLANIMETRICHE



(Geom. *Giuseppe La Franca*)

## Introduzione

La realizzazione di una strada costituisce un momento della pianificazione urbanistica del territorio, dunque viene sempre preceduta da un'attenta analisi che porta alla definizione dei seguenti aspetti:

- indagini statistiche per valutare il futuro traffico, sia quantitativamente (volume del traffico) sia qualitativamente (natura del traffico);
- classificazione della nuova strada secondo le categorie previste dalla Normativa 5/11/2001, in modo che resti definita la velocità di progetto e le caratteristiche geometriche della piattaforma;
- indagini geologiche sulla natura dei terreni che saranno interessati dal futuro tracciato;
- valutazione della consistenza dei centri abitati presenti nella zona, per l'eventuale loro influenza sull'andamento del tracciato.

I primi due punti portano al dimensionamento della strada ( $L$ ,  $R_{\min}$ ,  $p_{\max}$  e così via), il terzo e quarto punto portano alla definizione del tracciato (percorso).

La realizzazione di una strada (in generale di un'opera pubblica), come una qualunque opera civile, deve passare attraverso l'approvazione di tre fasi progettuali distinte:

- *Progetto Preliminare*: ha lo scopo di verificare la possibilità di realizzazione dell'opera, sotto il duplice aspetto tecnico ed economico.
- *Progetto Definitivo*: ha il compito di sviluppare e precisare le scelte embrionali contenute nel progetto preliminare, con la definizione del tracciato in tutti i suoi aspetti, e dei costi connessi.
- *Progetto Esecutivo*: è la fase conclusiva della progettazione, dopo che l'asse stradale è stato materializzato (picchettamento) sul terreno, al fine di verificarne le scelte progettuali affinché esse possano essere confermate oppure corrette a seguito delle indicazioni ottenute durante le operazioni.

L'asse di una strada è costituito da una linea non piana che si sviluppa nello spazio, dunque dovrebbe essere riprodotta con rappresentazioni tridimensionali. Tuttavia, per ragioni di praticità, è consuetudine studiarne separatamente l'andamento planimetrico (o planimetria) e l'andamento altimetrico (o profilo longitudinale). Naturalmente è necessario il perfetto coordinamento tra questi due elaborati.

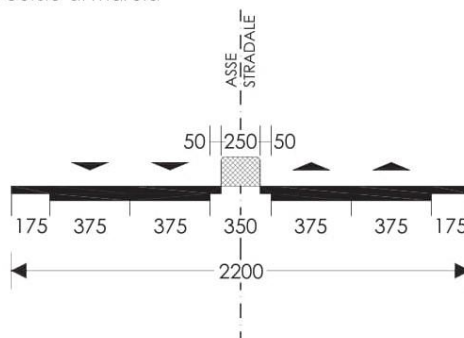
- ✓ *Planimetria*: è la proiezione dell'asse stradale sul piano orizzontale di riferimento (di norma il tracciato più economico è quello che si stacca il meno possibile dal terreno e che si discosta il meno possibile dal collegamento diretto dei due estremi in pianura, oppure dal tracciolino in montagna).
- ✓ *Profilo Longitudinale*: rappresenta l'andamento altimetrico, sia del terreno che della piattaforma, in corrispondenza dell'asse stradale, supposto sviluppato sopra a un unico piano verticale di rappresentazione.

Il progetto in esame tratta della realizzazione di un'infrastruttura viaria, rotatoria di accesso, inserita nel *Comune di Partinico*, della provincia di Palermo. Tale infrastruttura si svilupperà in *ambito extraurbano* e apparterrà alla *categoria B* (strade extraurbane principali). Lo sviluppo della rotatoria ha lo scopo di consentire l'accesso al parcheggio di interscambio nel Comune di Partinico (PA) e di collegare i due punti estremi della nuova strada in esame da 140,00 m s.l.m. (lato cimitero) a 132,00 m s.l.m. (lato direzione autostrada).



Il tracciato ha una lunghezza di 288,00 m circa ed è composto da 2 rettili e 3 curve circolari a raggio costante raccordate opportunamente da curve a raggio variabile (2 clotoidi), e da una rotatoria convenzionale (raggio 20,85 m). La configurazione della piattaforma come previsto dal C.d.S. è quella base a 2 corsie, una per senso di marcia e con banchine laterali e zone di sosta di emergenza. Le dimensioni dei moduli e quelle relative alla banchina sono riportati nella figura seguente:

Soluzione base a 2+2 corsie di marcia



**Fig. 1. Categoria B Extraurbane Principali – Ambito Extraurbano di Servizio**

Ma per le strade già esistenti, per le finalità del progetto e ai fini di non effettuare grosse modifiche, le dimensioni delle carreggiate vengono mantenute quasi inalterate. Inoltre il progetto prevede l'adeguamento di solo due corsie di marcia esistenti, e non di 2+2 come da normativa, pertanto le condizioni rispettate sono 175+375+50.

I limiti dell'intervallo di velocità di progetto definiti dal *D.M. 5/11/2001* (Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade) sono:

- $V_p \text{ min. } 40 \text{ km/h}$
- $V_p \text{ max. } 100 \text{ km/h}$

In seguito ad un dettagliato studio dell'andamento orografico del territorio che accoglierà l'opera (osservazione delle curve di livello, impluvi, displuvi, zone pianeggianti, costoni, depressioni, corsi d'acqua ed eventuali vincoli territoriali presenti), tra le possibili soluzioni abbozzate si è pervenuti alla scelta definitiva del tracciato. Nella definizione dell'asse di una strada, tradizionalmente si studia separatamente l'andamento planimetrico da quello altimetrico. Secondo tale impostazione il tracciato planimetrico è costituito da una successione di elementi geometrici tradizionali, quali i rettili, le curve circolari ed i raccordi a raggio variabile, mentre quello altimetrico si articola in una successione di livellette e raccordi concavi o convessi. Ai fini di garantire una soluzione sicura, confortevole per gli utenti e soddisfacente dal punto di vista ottico, è necessario adottare per la planimetria e l'altimetria, soluzioni coordinate e compatibili con le velocità di progetto.

## 1. Andamento Planimetrico

Lo studio del tracciato planimetrico è la prima e la più importante tra le attività progettuali; da essa dipenderanno tutti i successivi elaborati tecnici, l'efficienza della strada, i connessi aspetti economici. In generale lo studio del tracciato in proiezione orizzontale presenta numerose soluzioni possibili; per individuare quella più conveniente (percorso più breve, limitati scostamenti dal piano campagna ecc.), il progettista ha a disposizione due tracciati ideali che fungono da guida e da riferimento nella fase di studio del percorso. In pianura, o in terreni a lieve pendio, quando non vi siano controindicazioni di altro tipo, il percorso guida è costituito dal collegamento diretto tra i punti da collegare con la strada, quindi non è necessario progettare previa definizione del "tracciolino".

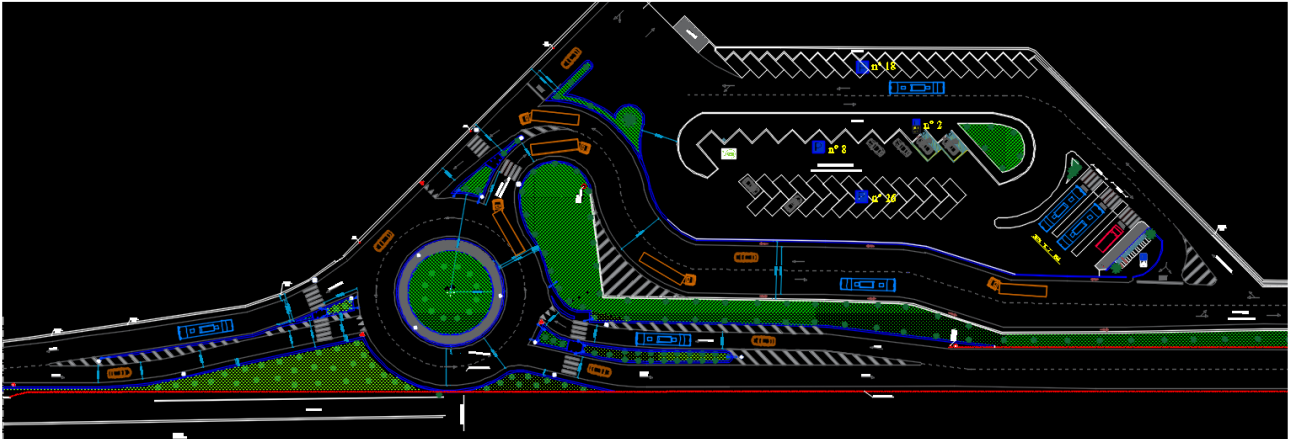
| TIPO DI STRADA            |   | AMBITO URBANO | AMBITO EXTRAURBANO |
|---------------------------|---|---------------|--------------------|
| AUTOSTRADA                | A | 6%            | 5%                 |
| EXTRAURBANA<br>PRINCIPALE | B | -             | 6%                 |
| EXTRAURBANA<br>SECONDARIA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

*Fig. 2. Pendenze massime adottabili per i diversi tipi di strada.*



Il tracciato modificato rispetta i principali criteri di progettazione:

- il percorso non dovrà presentare eccessive tortuosità;
- il percorso dovrà essere il più breve possibile;
- le opere d'ingegneria (muri, ponti, gallerie ecc.) dovranno essere in numero limitato;
- occorrerà evitare terreni geologicamente non idonei o male esposti.



*Fig. 3. Planimetria con le modifiche apportate.*

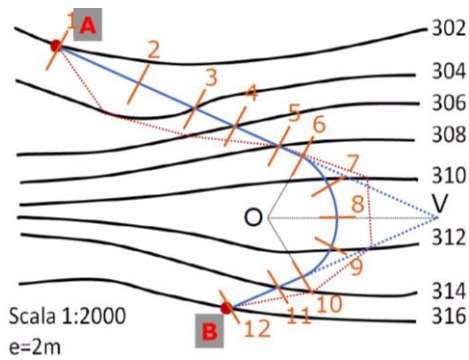
L'asse è stato individuato tenendo in considerazione diversi vincoli:

- morfologia del territorio;
- lotto di particolare pregio da evitare o da espropriare;
- fabbricati esistenti.

### ***1.1. Picchetti d'asse***

I *picchetti d'asse* sono punti appartenenti all'asse stradale utilizzati per rappresentarlo e per materializzarlo sul terreno nelle operazioni di picchettamento (da cui il nome "picchetti"). Essi vengono numerati progressivamente e sono fissati in ambito progettuale con i seguenti criteri:

- all'inizio e alla fine della strada;
- quando l'asse stradale interseca le curve di livello;
- nei punti caratteristici delle curve (punti di tangenza e medio);
- nei punti di divisione delle curve (1/4, 1/6 ecc.);
- all'inizio e alla fine di ogni manufatto (tombini, muri, viadotti ecc.);
- in corrispondenza di intersezioni con altre strade;
- evitare distanze tra due picchetti consecutivi superiori a 60-70 m.



**Fig. 4. Numerazione dei picchetti d'asse.**

### 1.2. Il tracciato stradale: i rettifili

Il tracciato rappresenta la sequenza dei rettifili e delle curve che li raccordano, con cui si collegano gli estremi della strada. Le modalità con le quali i rettifili (e di conseguenza le curve) si succedono dando luogo al percorso stradale, dipendono dalla morfologia del terreno, degli ostacoli che si trovano sullo stesso percorso, dalle scelte progettuali. I rettifili non devono essere troppo lunghi, dando luogo a tracciati monotoni che compromettono l'attenzione alla guida e che favoriscano il superamento delle velocità consentite, oltre a ridurre le possibilità di abbagliamento nella guida notturna e a favorire l'inserimento della strada nel territorio. La Normativa impone che i rettilinei abbiano una lunghezza contenuta nel limite:

- **Lunghezza massima (m):**  $L_R \leq 22 \times V_p$
- **Lunghezza minima (tabella sottostante)**

| Velocità (km/h)      | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90  | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
|----------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Lunghezza minima (m) | 30 | 40 | 50 | 65 | 90 | 115 | 150 | 190 | 250 | 300 | 360 |

con  $V_p$  (velocità max di progetto) in km/h e  $L_R$  in metri. Un rettifilo, per poter essere percepito come tale dall'utente, deve avere una lunghezza non inferiore ai valori riportati nella tabella; per velocità si intende la massima desunta dal diagramma di velocità per il rettifilo considerato.

Nel nostro caso, essendo  $V_p$  pari a 100 km/h, possiamo dedurre che le condizioni sono:

- $L_R$  deve essere sempre  $\leq 2.200$  m (il rettifilo originario viene con la rotonda spezzato in due rettifili di lunghezza inferiore a quella appena descritta);
- la lunghezza minima da rispettare è di 150 m.

I rettifili presenti sono i seguenti (da lato cimitero verso imbocco autostrada):

- ✓ Rettifilo 1: lunghezza 150.00 m (anche se continua ad estendersi verso lato cimitero);
- ✓ Rettifilo 2: lunghezza 150 m (estendendosi verso direzione autostrada).

### 1.3. Pendenza trasversale della piattaforma nei rettifili

Per assicurare il rapido deflusso delle acque superficiali ed impedire che si inneschino fenomeni pericolosi (aquaplaning), la piattaforma stradale, in rettifilo, deve avere una certa pendenza trasversale. Indipendentemente dal tipo di strada, la pendenza minima delle falde della carreggiata,  $i_c$ , è del 2,5% ( $q=0,025$ ). Valori inferiori saranno impiegati solo nei tratti di transizione tra elementi di tracciato caratterizzati da opposte pendenze trasversali.

A seconda del tipo di strada si adottano le sistemazioni di cui alla figura seguente:


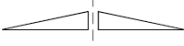



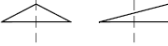
| STRADE TIPO                                      | PIATTAFORMA   | PENDENZE TRASVERSALI  |
|--|---|---|
| A, B, D<br>a due o più corsie per<br>carreggiata |  |   |
| E<br>a quattro corsie                            |  |  |
| altre strade                                     |  |   |

Fig. 5. Pendenze trasversali in funzione del tipo di strada.

### 1.4. Il tracciato stradale: le curve circolari

Il parametro geometrico che caratterizza le curve circolari è il raggio di curvatura  $R$ . I raggi  $R$  delle curve circolari sono scelti in modo da armonizzare e ottimizzare il percorso stradale. Tuttavia la normativa prevede alcune limitazioni alla discrezionalità progettuale. Un altro parametro geometrico molto importante è lo *sviluppo* della curva circolare ovvero la lunghezza dell'arco di cerchio inserito nel tracciato stradale. Affinché il conducente possa percepire correttamente la curva, è necessario che essa abbia uno sviluppo minimo non inferiore ad una certa quantità. A tal proposito la nuova Normativa afferma che: “una curva circolare, per poter essere correttamente percepita deve avere uno sviluppo corrispondente ad un tempo di percorrenza di almeno 2.5 secondi valutato con riferimento alla velocità di progetto della curva”.

$$L \geq v_p \times t = \frac{V_p}{3,6} \times t$$

dove:

- $L$  = sviluppo della curva circolare;
- $t$  = tempo di percorrenza fissato in 2.5 secondi;
- $v_p$  = velocità di progetto della curva letta sul diagramma delle velocità in m/s;
- $V_p$  = velocità di progetto della curva letta sul diagramma delle velocità in km/h.

In curva la carreggiata è inclinata verso l'interno. La pendenza trasversale è la stessa su tutta la lunghezza dell'arco di cerchio. La pendenza massima vale 7% ( $q = 0.07$ ) per le strade tipo A (urbane ed extraurbane), tipo B, C, F extraurbane e strade di servizio extraurbane; vale 5% per le strade di tipo D e 3.5% per le strade di tipo E ed F urbane, nonché per le strade di servizio delle autostrade urbane e delle strade di scorrimento. Per la determinazione della pendenza in funzione del raggio è indispensabile stabilire il legame tra la velocità di progetto  $V_p$ , la pendenza trasversale in curva  $i_c$  e la quota parte del coefficiente di aderenza impegnato trasversalmente  $f_t$ . Dallo studio dell'equilibrio di un veicolo transitante su una curva circolare si ottiene:

$$\frac{V_p^2}{R \times 127} = q + f_t$$

dove:

- $V_p$ , velocità di progetto della curva [km/h];
- $R$ , raggio della curva circolare [m];
- $q$ , pendenza trasversale in curva ( $i_c/100$ );
- $f_t$ , coefficiente di aderenza trasversale (dipende dalla velocità):

$$f_t = 0,325 - 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot V - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot V^2 \quad (\text{valida per } V = 30 \div 140 \text{ km/h})$$

Esplicitando  $R$ , si ottiene:

$$R = \frac{V_p^2}{127(q + f_t)}$$

Per il raggio minimo  $R_{min}$  delle curve circolari la Normativa impone che: “Per una strada di assegnato intervallo di velocità di progetto, il raggio minimo  $R_{min}$  è quello calcolato con l'espressione dianzi citata e con la velocità al limite inferiore dell'intervallo di progetto, per una pendenza trasversale pari alla  $q_{max}$ , nonché per un impegno di aderenza trasversale pari a  $f_{t,max}$ ”. La formula per il calcolo del raggio minimo diventa:

$$R_{min} = \frac{V_{p,min}^2}{127(q_{max} + f_{t,max})}$$

Per quanto riguarda la quota limite del coefficiente di aderenza impegnabile trasversalmente  $f_{t,max}$ , valgono i valori di seguito riportati. Tali valori tengono conto, per ragioni di sicurezza, che una quota parte dell'aderenza possa essere impegnata anche longitudinalmente in curva.

| Velocità km/h   | 25   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| aderenza trasv. max imp. $f_{t,max}$ per strade tipo A, B, C, F extra urbane, e relative strade di servizio | -    | 0,21 | 0,17 | 0,13 | 0,11 | 0,10 | 0,09 |
| aderenza trasv. max imp. $f_{t,max}$ per strade tipo D, E, F urbane, e relative strade di servizio          | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,16 | -    | -    | -    |

**Fig. 6. Coefficiente di aderenza trasversale in funzione della velocità.**



Nel caso della strada B urbana analizzata, il valore calcolato di raggio minimo della curva è il seguente:

$$R_{min} = \frac{V_{p,min}^2}{127(q_{max} + f_{t,max})} = \frac{40^2}{127(0,07 + 0,147)} = 58 \text{ m}$$

Per raggi maggiori di  $R_{min}$  si utilizzano gli abachi di cui alle figure 7 (strade tipo A urbane ed extraurbane, tipo B, C, F extraurbane e strade di servizio extraurbane) e 8 (strade tipo D, E, F urbane e strade di servizio urbane), procedendo nel modo di seguito riportato. Finché il raggio è minore di quello  $R^*$  calcolato con l'espressione citata all'inizio del paragrafo per la velocità  $V_{max}$  di progetto, per la pendenza  $i_{max}$  e per  $f_{t,max}$ , la pendenza trasversale dovrà essere mantenuta costante e pari al valore massimo. In tale campo, cioè per  $R_{min} \leq R \leq R^*$ , la velocità di progetto  $V_p$  è data dall'espressione già citata, sempre con  $f_{t,max}(V_p)$ .

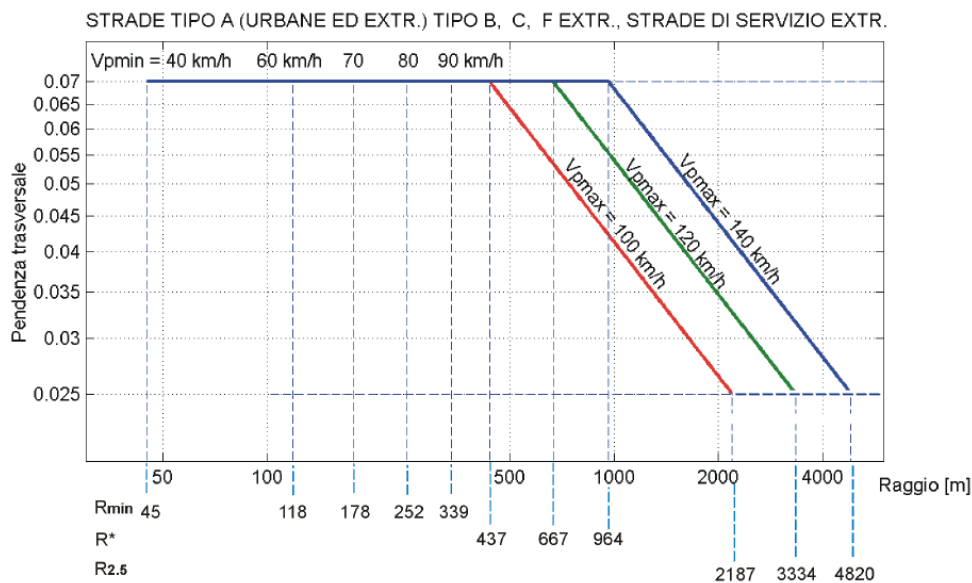


Fig. 7. Valori di  $R_{min}$ ,  $R^*$ ,  $R_{2.5}$  in funzione della pendenza trasversale e della velocità di progetto.

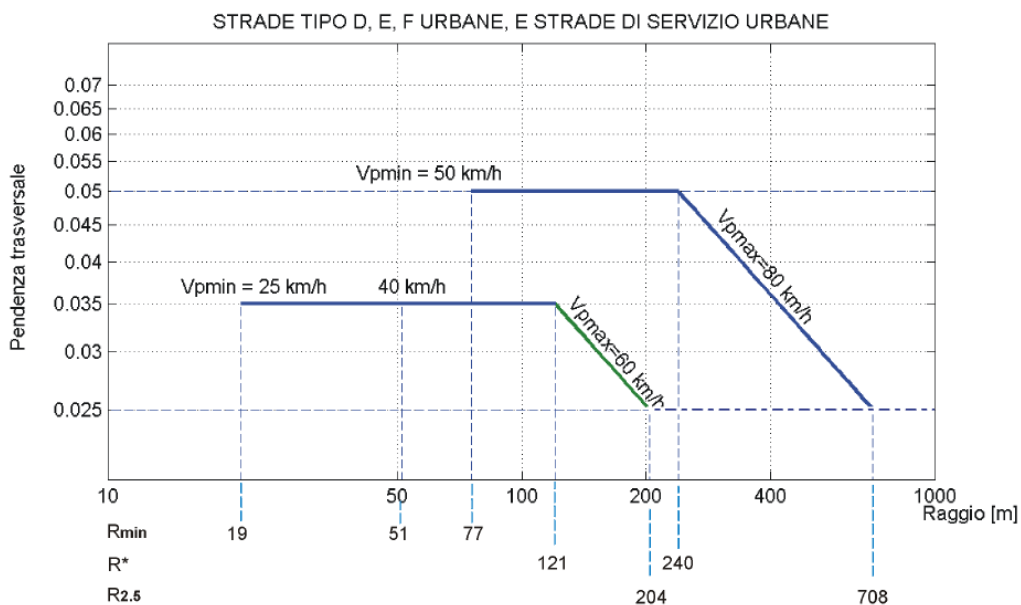


Fig. 8. Valori di  $R_{min}$ ,  $R^*$ ,  $R_{2.5}$  in funzione della pendenza trasversale e della velocità di progetto.

Nel caso della strada di tipo B è stato ricavato il seguente valore:

$$R^* = \frac{V_{p,max}^2}{127(q_{max} + f_{t,max})} = \frac{100^2}{127(0,07 + 0,147)} = 363 \text{ m}$$

La pendenza trasversale 2,5% deve essere impiegata quando il raggio di curvatura è uguale o maggiore ai valori del raggio  $R_{2,5}$ , riportati nelle figure precedenti. Per la strada che stiamo analizzando il valore di  $R_{2,5}$  è pari a 204 m, come si può dedurre dalla figura 11. Oppure, si può calcolare come segue:

$$R_{2,5} = K \cdot R^* = 1,69 \cdot 363 = 613 \text{ m}$$

$R_{2,5}$  è il raggio di curvatura cui corrisponde la minima pendenza trasversale del 2,5% con coefficiente di sicurezza K maggiore di 1. In particolare:

- K = 5, per strade tipo A (urbane ed extraurbane), per le strade tipo B e C, per le strade F extraurbane, nonché per le strade di servizio extraurbane;
- K = 1.69, per strade tipo E, per le strade F urbane, nonché per le strade di servizio;
- K = 2.95, per strade tipo D.

Per valori del raggio non inferiori a quelli R' indicati nella figura seguente, è possibile conservare la sagoma in contropendenza al valore - 2,5 %.

|             |       |      |                    |      |               |
|-------------|-------|------|--------------------|------|---------------|
| STRADA TIPO | A     | B    | C<br>F extraurbane | D    | E<br>F urbane |
| R' [m]      | 10250 | 7500 | 5250               | 2000 | 1150          |

|                    |                   |             |                    |      |
|--------------------|-------------------|-------------|--------------------|------|
| STRADA DI SERVIZIO | A<br>extraurbane. | A<br>urbane | B<br>F extraurbane | D    |
| R' [m]             | 5250              | 1150        | 5250               | 1150 |

**Fig. 9. Valori del raggio R' in funzione del tipo di strada.**

Dunque, nel caso di una strada di tipo F urbana, tale valore è pari a 1150 m. Per strade soggette a frequente innevamento la pendenza trasversale va limitata al 6% e di conseguenza il raggio minimo utilizzabile è quello che corrisponde negli abachi a tale valore. La *pendenza geodetica J* risultante dalla combinazione della pendenza trasversale  $i_c$  e di quella longitudinale  $i_l$ , pari a:

$$J = \sqrt{i_l^2 + i_c^2}$$

non deve superare il valore del 10% per le strade di tipo A e B e del 12% per le altre; nel caso di strade a frequente innevamento tale valore limite è dell'8%. La pendenza trasversale calcolata con i criteri ora descritti deve essere estesa all'intera piattaforma, banchine comprese. In galleria la pendenza trasversale minima può essere ridotta all'1%. Le norme descritte in questo paragrafo non si applicano alla progettazione dei tornanti delle strade di montagna, dove il raggio è inferiore a quello minimo ricavato col criterio.

Ricapitolando:

- 1)  $R_{min}(V_{p,min}, q_{max}) \leq R \leq R^*(V_{p,max}, q_{max})$ : la pendenza trasversale deve essere pari a quella massima ( $q_{max}$ ) stabilita dalla Normativa.
- 2)  $R^*(V_{p,max}, q_{max}) \leq R \leq R_{2.5}(V_{p,max}, q_{min})$ : la pendenza trasversale deve essere definita per mezzo degli abachi riportati. Si ipotizza noto il raggio di curvatura.
- 3)  $R > R_{2.5}$ : la pendenza trasversale deve essere pari al valore minimo  $q_{min}$  stabilito dalla Normativa che, per tutte le tipologie di strade è fissato in ragione del 2,5%.

Per quanto concerne le curve circolari inserite nel progetto, esse presentano le seguenti caratteristiche:

- *Curva circolare 1*:  $R = 105.00$  m,  $SV = 21.66$  m. Essendo  $R_{min} < R < R^*$ ,  $q = 0.035$ ;
- *Curva circolare 2*:  $R = 107.00$  m,  $SV = 16.25$  m. Essendo  $R_{min} < R < R^*$ ,  $q = 0.035$ .

### ***1.5. Curve a raggio variabile (Clotoidi)***

Il passaggio dal rettilineo ad una curva e, più in generale, il collegamento di più curve, avviene con l'ausilio dei raccordi progressivi o curve a raggio variabile in modo da avere una graduale applicazione della forza centrifuga. Esse devono essere progettate in modo da garantire:

- una variazione di accelerazione centrifuga non compensata (contraccolpo) contenuta entro valori accettabili attraverso un graduale passaggio delle pendenze da doppia falda a singola falda (criterio dinamico);
- una limitazione della pendenza (o sovrappendenza) longitudinale delle linee di estremità della carreggiata rispetto alla pendenza dell'asse (criterio geometrico);
- la percezione ottica corretta dell'andamento del tracciato (criterio ottico).

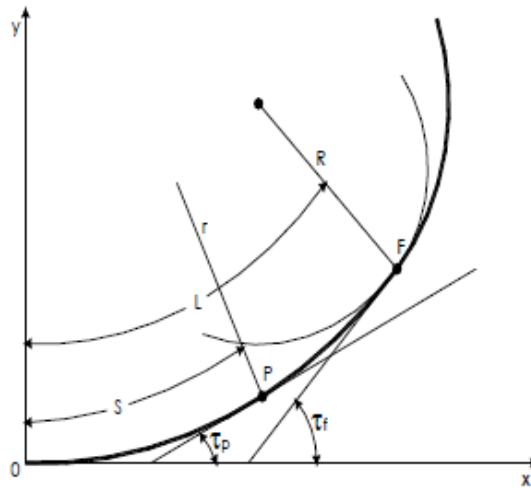
Una curva di transito, nei punti estremi, deve essere tangente ed avere lo stesso raggio degli elementi che sono raccordati (ad es. rettilineo e curva circolare), ovviamente esistono molte curve che rispettano questa condizione. Il *D.M. 5/11/2001* conferma la scelta della "Clotoide" come *curva a raggio variabile* da impiegare nella progettazione stradale. Questa curva appartiene alla famiglia delle spirali generalizzate. Il raggio di curvatura varia in modo continuo da un valore infinitamente grande, fino a un valore comunque piccolo, nel rispetto della seguente equazione:

$$r \cdot s = A^2$$

I cui elementi geometrici caratteristici sono i seguenti.

- $A$ , parametro di scala (dimensioni di una lunghezza);
- $r$ , raggio di curvatura nel punto P generico;

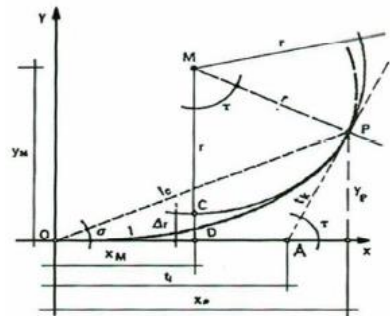
- $s$ , ascissa curvilinea nel punto P generico;
- $F$ , punto finale della clotoide;
- $R$ , raggio del cerchio;
- $L$ , lunghezza dell'arco di clotoide;
- $\tau_p$ , angolo di deviazione nel punto P generico;
- $\tau_f$ , angolo di deviazione nel punto finale della clotoide.



Nell'origine  $s = 0$  ed  $r = \infty$  e all'aumentare di  $s$  diminuisce  $r$ . Per ogni punto P di ascissa curvilinea  $s$ , si possono calcolare le coordinate cartesiane:

$$\begin{cases} X_p \approx s \\ Y_p \approx \frac{s^2}{6} \times R \end{cases}$$

Nel generico punto P possono definirsi diversi elementi geometrici caratteristici della clotoide.



- $\tau$ , angolo di deviazione;
- $r$ , raggio del cerchio osculatore (cerchio tangente con lo stesso raggio della clotoide);
- $CD = \Delta r$ , scostamento;
- $t_1$ , tangente lunga;
- $t_2$ , tangente corta.

Tutti gli elementi sono proporzionali ad A. Si ricava quindi il valore del *parametro* A della clotoide:

$$A = \sqrt[4]{24R^3 \cdot \Delta R \cdot \left(1 + \frac{3}{14} \cdot \frac{\Delta R}{R}\right)}$$

A può variare secondo le scelte progettuali, avrà un valore piccolo se vogliamo una riduzione veloce di *r* rispetto ad *s*. Se A è piccolo allora il raccordo sarà corto, invece, se A è grande, il raccordo sarà più lungo e quindi più graduale. Occorre soddisfare i 3 criteri (*dinamico, geometrico e ottico*) per determinare il *valore minimo del fattore di scala, A<sub>min</sub>*, da impiegare nella progettazione.

### 1. Criterio Dinamico (limitazione del contraccolpo):

Affinché lungo un arco di clotoide si abbia una graduale variazione dell'accelerazione trasversale non compensata nel tempo (contraccolpo *c*), fra il parametro A e la massima velocità, V (km/h), desunta dal diagramma di velocità, per l'elemento di clotoide deve essere verificata la relazione:

$$A \geq A_{min} = \sqrt{\frac{V^3}{c} - \frac{gVR(q_f - q_i)}{c}}$$

dove:

- $q_i = i_{ci}/100$ ,  $i_{ci}$  è la pendenza trasversale nel punto iniziale della clotoide;
- $q_f = i_{cf}/100$ ,  $i_{cf}$  è la pendenza trasversale nel punto finale della clotoide.

Trascurando nell'espressione il termine:

$$\frac{gVR(q_f - q_i)}{c}$$

Assumendo per il contraccolpo *c* il valore limite tale che l'utente non subisca disagio pari a:

$$c_{max} = \frac{50.4}{V}$$

Risulta:

$$A_{min,1} = 0.021 \cdot V^2$$

Nel caso in esame, calcoliamo  $A_{min,1}$  per ogni curva circolare, osservando il diagramma delle velocità:

- Curva 1:  $V_p = 40$  km/h,  $A_{min,1} = 33.6$ ;
- Curva 2:  $V_p = 40$  km/h,  $A_{min,1} = 33.6$ .



2. *Criterio Geometrico* (sovrappendenza longitudinale delle linee di estremità della carreggiata):

Nelle sezioni di estremità di un arco di clotoide la carreggiata stradale presenta differenti assetti trasversali, che vanno raccordati longitudinalmente, introducendo una sovrappendenza nelle linee di estremità della carreggiata rispetto alla pendenza dell'asse di rotazione. Nel caso in cui il raggio iniziale sia di valore infinito (rettilineo o punto di flesso), il parametro deve verificare la seguente disuguaglianza:

$$A \geq A_{min,2} = \sqrt{\frac{R \cdot 100 \cdot B_i \cdot (q_i + q_f)}{\Delta i_{max}}}$$

dove:

$B_i$  [m] = distanza fra l'asse di rotazione ed il ciglio della carreggiata nella sezione iniziale della curva a raggio variabile;

$\Delta i_{max}$  (%) = sovrappendenza longitudinale massima della linea costituita dai punti che distano  $B_i$  dall'asse di rotazione (figura 13); in assenza di allargamento tale linea coincide con l'estremità della carreggiata;

$q_i = i_{ci}/100$ ,  $i_{ci}$  è la pendenza trasversale iniziale, in valore assoluto;

$q_f = i_{cf}/100$ ,  $i_{cf}$  è la pendenza trasversale finale, in valore assoluto.

Nel caso in cui anche il raggio iniziale sia di valore finito (continuità) il parametro deve verificare la seguente disuguaglianza:

$$A \geq \sqrt{\frac{B_i \cdot (q_f - q_i)}{\left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f}\right) \cdot \frac{\Delta i_{max}}{100}}}$$

dove:

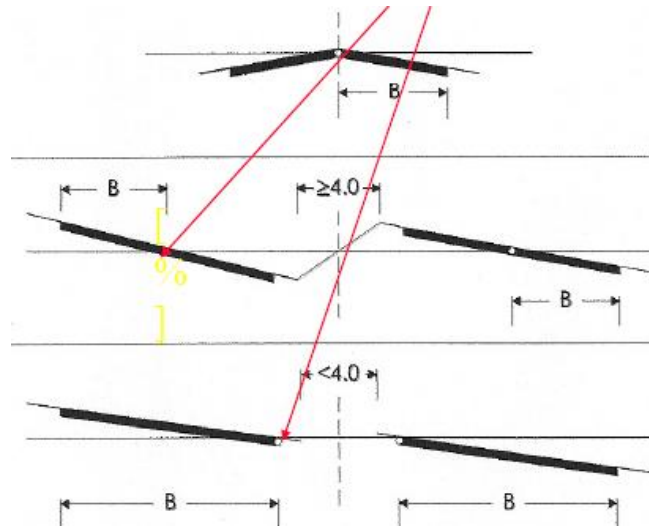
- $R_i$  = raggio nel punto iniziale della curva a raggio variabile [m];
- $R_f$  = raggio nel punto terminale della curva a raggio variabile [m].

*Valori massimi della pendenza  $\Delta i$* : per limitare la velocità di rotazione trasversale dei veicoli (velocità di rollio), la sovrappendenza longitudinale  $\Delta i$  [%] delle estremità della carreggiata (esclusi gli eventuali allargamenti in curva) non può superare il valore massimo definito dalla seguente espressione.

$$\Delta i_{max} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{B_i}{v} \cdot 100 \cong 18 \cdot \frac{B_i}{V} \quad [\%]$$

dove:

- $dq/dt$  = variazione della pendenza trasversale nel tempo pari a 0.05 rad/sec;
- $V$  = velocità di progetto in km/h, ovvero  $v$  = velocità di progetto in m/s.



**Fig. 10. Asse di rotazione.**

Calcoliamo  $A_{min,2}$  per ogni curva del progetto:

- Curva 1:  $R = 105.00$  m,  $B_i = 1.875$  m,  $V_p = 40$  km/h,  $\Delta i_{max} = 0.19\%$ ,  $q_i = 0.025$ ,  $q_f = 0.025$  →  
 $A_{min,2} = 72.0$ ;
- Curva 2:  $R = 107.88$  m,  $B_i = 1.875$  m,  $V_p = 40$  km/h,  $\Delta i_{max} = 0.19\%$ ,  $q_i = 0.025$ ,  $q_f = 0.025$  →  
 $A_{min,2} = 73.0$ ;

Valori minimi della pendenza  $\Delta i$ : durante una certa fase della rotazione la pendenza trasversale può assumere un valore  $\leq 2.5\%$  (necessaria per il deflusso delle acque). In questi casi, allo scopo di evitare che si formi un velo idrico di spessore pericoloso è necessario che la pendenza longitudinale  $\Delta i$  dell'estremità che si solleva non sia inferiore ad un prefissato valore  $\Delta i_{min}$  dato da:

$$\Delta i_{min} = 0,1 \cdot B_i \quad [\%]$$

La pendenza longitudinale minima (delle livellette) da garantire affinché l'acqua scorra è del 3%.

Per quanto concerne il progetto ivi presente, il  $\Delta i_{min}$  calcolato presenta un valore pari a 0.275%.

### 3. Criterio Ottico:

Per garantire la percezione ottica del raccordo e per fare in modo che l'utente "avverta" i benefici della clotoide deve essere verificata la relazione:

$$A \geq A_{min,3} = R/3$$

Per garantire la percezione dell'arco di cerchio alla fine della clotoide, deve essere  $A \leq A_{max} = R$  (raggio di curvatura nel punto finale).

Nel progetto in esame i valori ricavati sono i seguenti:

- Curva 1:  $R = 105.00 \text{ m} = A_{max}, A_{min,3} = 35.00$ ;
- Curva 2:  $R = 107.88 \text{ m} = A_{max}, A_{min,3} = 36.00$ ;

Si assume come valore minimo di  $A$ :  $A_{min} = \max(A_{min,1}, A_{min,2}, A_{min,3})$ . In definitiva bisogna determinare il parametro  $A$  in modo che:  $A_{min} \leq A \leq A_{max}$ .

***Determinazione del parametro  $A$  delle clotoidi:***

Sono noti il valore del *raggio*  $R$  della curva circolare e dello *scostamento*  $\Delta r$  assegnato per tentativi. Dall'espressione:

$$A = \sqrt[4]{24R^3 \cdot \Delta r \cdot \left(1 + \frac{3}{14} \cdot \frac{\Delta r}{R}\right)}$$

è possibile ricavare il valore di  $A$  e verificare che soddisfi i tre criteri sopra descritti. Nel progetto della strada F urbana, i valori ottenuti sono i seguenti:

- Curva 1:  $R = 105.00 \text{ m} = A_{max}, A_{min,1} = 33.60, A_{min,2} = 72.00, A_{min,3} = 35.00 \rightarrow 72.00 \leq A \leq 105.00$   
 $\rightarrow \Delta r = 0.97 \text{ m}, A = 72.01$ .
- Curva 2:  $R = 107.88 \text{ m} = A_{max}, A_{min,1} = 33.60, A_{min,2} = 73.00, A_{min,3} = 36.00 \rightarrow 66.30 \leq A \leq 105.88$   
 $\rightarrow \Delta r = 0.8 \text{ m}, A = 70.10$ .

Tutte le condizioni sono state rispettate, quindi, le clotoidi sono state inserite correttamente. Ovviamente, per ogni curva circolare, la clotoide in ingresso e quella in uscita sono identiche. Ottenuto  $A$ , si possono anche calcolare le grandezze caratteristiche delle clotoidi appartenenti al tracciato:

$$\tau = \frac{A^2}{2 \cdot R^2}$$

Angolo generato dal raggio di curvatura quando il punto generico che descrive la clotoide si sposta dall'ascissa di raggio  $R_0 = \infty$  al punto finale di raggio  $R$ .

- $t_l = x_p - y_p \cdot \cotg \tau$  ***segmento di tangente lunga***
- $t_k = \frac{y_p}{\sin \tau}$  ***segmento di tangente corta***
- $\begin{cases} x_M = x_p - R \sin \tau \cong s/2 \\ y_M = y_p + R \cos \tau = R + \Delta R \end{cases}$  ***coordinate del centro del cerchio***