
6. Strade: sviluppo del progetto

*Esercitazioni
grafiche
pag. 489*

*Esercitazioni
numeriche
pag. 485*

6.1 Allegati di un progetto stradale

Secondo la normativa ministeriale del 14-10-1968, il progetto definitivo di una strada deve essere corredato dei seguenti elaborati:

- 1) Relazione generale e caratteristiche del tracciato;
- 2) Relazione particolareggiata;
- 3) Corografia generale in scala 1 : 25 000;
- 4) Planimetria esecutiva in scala 1 : 1 000 ovvero 1 : 2 000;
- 5) Profilo longitudinale in scala 1 : 1 000 per le lunghezze e 1 : 100 per le altezze, ovvero 1 : 2 000 e 1 : 200;
- 6) Sezioni tipo della strada, della sovrastruttura e dei muri di sostegno e controripa;
- 7) Sezioni trasversali in scala 1 : 100 ovvero 1 : 200;
- 8) Profilo geognostico con indicazione degli assaggi fatti;
- 9) Calcoli geotecnici (stabilità del corpo stradale e di tutti i lavori in terra);
- 10) Calcoli di stabilità e dimensionamento delle sovrastrutture;
- 11) Calcoli e disegni delle opere d'arte maggiori;
- 12) Tipi delle opere d'arte minori;
- 13) Incroci e innesti con altre strade;
- 14) Schema di andamento planimetrico dell'asse stradale in scala 1 : 10 000, con spiegazioni riguardanti la visibilità;
- 15) Piano parcellare di esproprio con i nulla osta degli enti interessati;
- 16) Computo metrico;
- 17) Analisi dei prezzi;
- 18) Stima dei lavori, delle singole opere e delle espropriazioni;
- 19) Stima generale riassuntiva;
- 20) Capitolato speciale d'appalto;
- 21) Elaborati per la determinazione dei parametri revisionali.

Soltanto per strade di scarsa importanza e quando non sia pregiudizievole alla buona progettazione della strada e alla sicurezza del traffico, si può omettere qualcuno dei suddetti elaborati.

Il progetto definitivo viene comunque sempre preceduto da un **progetto preliminare**, fornito solo di elementi schematici che rendono possibile il raffronto degli aspetti tecnico-economici di più tracciati, corredato degli elaborati 1, 3, 4, 5, 6, 19. A esso segue il **progetto di massima**, tendente a sviluppare più concretamente questi aspetti sulla sola soluzione prescelta, approfondendoli in modo sufficiente a garantire una buona previsione del costo di costruzione per l'approvazione del relativo onere finanziario; si richiedono gli allegati 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16.

Tutti gli elaborati (compresi i disegni) sono ripiegati nel formato 23×33 cm, di cui utili 21×31 cm, e sono disegnati e scritti in nero per quanto riguarda il terreno, in rosso per quanto si riferisce al progetto; gli sterri e i riporti sono colorati rispettivamente in giallo e in rosso.

Da quanto precede appare evidente che la progettazione di una strada interessa aspetti topografici, geognostici, geotecnici e costruttivi; nei paragrafi seguenti, noi ci occuperemo solo dei primi.

6.2 Relazione generale e caratteristiche del tracciato

Descrive i criteri generali adottati nella scelta del tracciato, in relazione alle caratteristiche orografiche del terreno, alla sua costituzione geologica, alla sua esposizione, alla sua convenienza economica, anche in relazione ad altre possibili soluzioni e alla influenza che la nuova strada avrà sui futuri sviluppi della zona.

Deve inoltre mettere in evidenza le località da collegare, lo sviluppo complessivo, la larghezza della sede stradale, il raggio minimo delle curve, il loro numero, il dislivello da superare, la pendenza massima in rettilineo e in curva.

Devono ancora essere evidenziati l'andamento altimetrico, la distribuzione dei movimenti di terra, il materiale adoperato per le opere murarie.

Per alcuni suoi contenuti, appare quindi evidente che la relazione può essere iniziata subito, ma può essere completata solo a progetto ultimato, essa purtuttavia costituisce, per la sua natura introduttiva e descrittiva, il primo allegato del progetto stesso.

6.3 Relazione particolareggiata

Descrive i criteri con i quali si passa dal tracciato del progetto di massima in scala 1 : 25 000 a quello definitivo in scala 1 : 1 000 ovvero 1 : 2 000; quest'ultimo essendo dedotto come variante del precedente sulla carta a scala più ampia ricavata con i rilievi plano-altimetrici eseguiti sul terreno lungo una striscia sufficientemente larga che segue il tracciato precedente.

Seguono le risultanze dei rilievi geognostici e geotecnici affidati a un geologo per stabilire le caratteristiche e la consistenza del terreno, specie in corrispondenza delle zone sulle quali dovranno sorgere importanti opere d'arte, e per confermare la eventuale idoneità degli sterri a costituire corrispondenti riporti. In caso negativo, quando cioè si deve ricorrere necessariamente a cave di prestito, se ne dà la localizzazione e si descrivono le caratteristiche dei materiali reperibili. Nel caso di scavi in roccia, i relativi materiali possono essere utilizzati per la realizzazione dei calcestruzzi di cemento da impiegare nella costruzione di muri di sostegno, spalle di ponti e altri manufatti.

Le stesse opere d'arte vengono poi descritte in ogni loro particolare, dando ampie ed esaurienti giustificazioni sugli attraversamenti d'acqua nelle zone prescelte e con i ponti progettati, anche in relazione agli studi idrogeologici compiuti per stabilire la portata di massima piena convogliata dal bacino imbrifero, e in relazione alle prove penetrometriche eseguite per dedurre le posizioni più convenienti per fondare le spalle e le pile dei ponti.

Nella relazione finale si trascrivono infine dettagliatamente le caratteristiche del sottofondo stradale (costituzione dei vari strati, loro numero, percentuali dei diversi componenti, spessore), definite anche in rapporto alla reperibilità dei materiali stessi in zone vicine e alla possibilità di resistere a determinati carichi. Sono riportate anche la natura e lo spessore dello strato di base e della pavimentazione.

6.4 Corografia generale

Nella corografia, eseguita su tavolette dell'I.G.M. nella scala 1 : 25 000, si riportano le risultanze degli studi relativi ai criteri generali e preliminari adottati per collegare con la strada in progetto le diverse località previste, mantenendo le pendenze nei limiti massimi imposti e tenendo il relativo tracciato quanto più è possibile aderente alla superficie naturale del terreno, per ridurre al massimo i movimenti di terra.

Stabiliti i punti estremi da collegare, su terreni pianeggianti il tracciato più conveniente è quello rettilineo; su terreni montagnosi e collinosi possono invece verificarsi i seguenti casi (fig. 6.1).

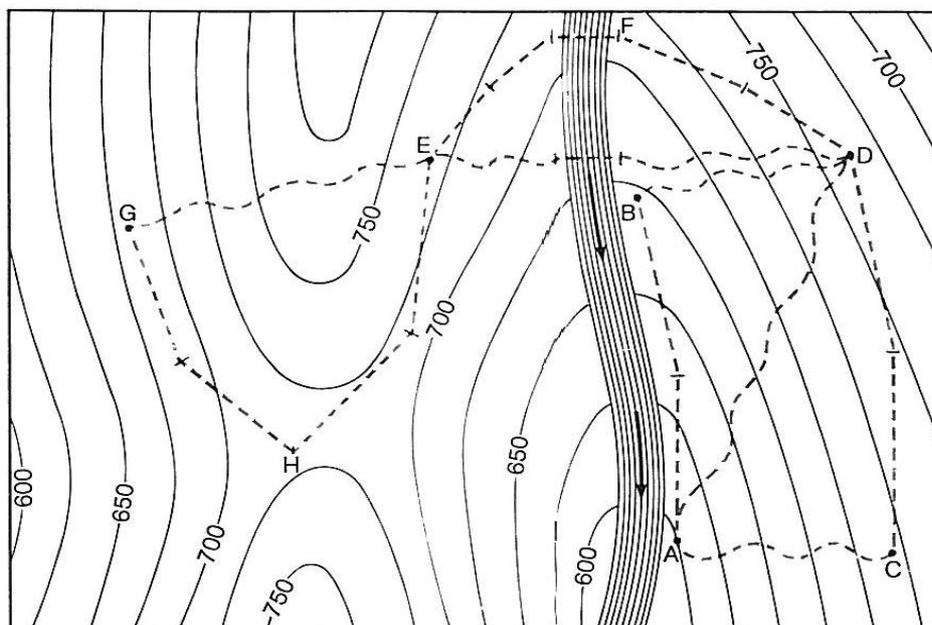


Figura 6.1 Tracciati stradali con diverse caratteristiche generali.

Strade di fondo valle

In genere seguono l'andamento plano-altimetrico del corso d'acqua che scorre in vallata (come *A-B*), mantenendosi costantemente in vicinanza della riva, su un lato del fiume, tranne nei casi in cui la valle è piuttosto corta e la pendenza del corso d'acqua è alquanto grande. Solitamente collegano centri abitati sorti in vicinanza del fiume per potere sfruttare le sue acque a scopo industriale. Sono soggette facilmente a franamenti e inondazioni e spesso scarsamente ventilate e poco illuminate. Per la facilità di accesso ai luoghi in cui devono sorgere e l'adattabilità al terreno preesistente, queste strade sono nel loro genere quelle più economiche.

Strade di cresta

Seguono approssimativamente le linee di dislivello del terreno (come *C-D*), collegando generalmente centri turistici. Sono stabili, ben ventilate e molto illuminate. Per la loro posizione sono però più costose delle precedenti.

Strade di tipo intermedio

Comprendono diversi tipi, quali:

- Le strade congiungenti due punti a diversa quota posti sullo stesso versante

di una valle (come *A* e *D*). Si può collegare questi punti con un tracciato serpeggiante attorno alla congiungente diretta (come *A-D*); oppure sviluppare il tracciato preminentemente in valle, per poi salire rapidamente in cresta (come *A-B-D*); oppure salire subito, per sviluppare poi il tracciato preminentemente in cresta (come *A-C-D*).

- Le strade congiungenti due punti posti sui versanti opposti della stessa valle (come *D* e *E*). Si può collegare questi punti con un tracciato ancora serpeggiante attorno alla congiungente diretta (come *D-E*); oppure collegarli con passaggio del fiume a monte (come *D-F-E*), dove è in genere più utile l'attraversamento del fiume col ponte da costruire.

- Le strade congiungenti due punti situati sui versanti adiacenti di due valli contigue (come *E* e *G*). Si può procedere ancora con un collegamento serpeggiante attorno a quello diretto (come *E-G*); oppure si può collegare più convenientemente i due punti attraverso il valico che separa le due vallate (come *E-H-G*).

Per avere la garanzia che tutti questi tracciati non superino in alcun punto il valore della massima pendenza ammissibile, si esegue quella *poligonale di guida o tracciolino* che descriveremo nel paragrafo successivo, parlando della planimetria esecutiva (ved. anche par. 17.7 - commi *H* e *I*) - del 2° volume).

Si osservi, infine, che non sempre il tracciato stradale viene studiato nell'intento di collegare le due località estreme col percorso più breve e quindi più economico; in molti casi è infatti opportuno imporre al tracciato dei *punti di passaggio obbligato* intermedi, anche a costo di allungare il percorso complessivo (per es. perché essi rivestono una particolare importanza panoramica, o perché costituiscono centri abitati che è opportuno allacciare perché molto prossimi al tracciato più diretto). Ecco perché ben raramente le strade notevolmente lunghe risultano rettilinee, anche se sono costruite in pianura.

6.5 Planimetria esecutiva

Nel caso di strada di notevole lunghezza, eseguito il *tracciato di massima* nella scala 1 : 25 000 (corografia generale), necessario per avere indicazioni approssimative sul presumibile *tracciato definitivo*, si realizza innanzi tutto una *carta a grande scala* (1 : 1 000 ovvero 1 : 2 000) su una striscia di terreno che si svolge lungo il tracciato di massima, in modo da rendere in seguito possibili su esso tutte le varianti imposte dalla progettazione esecutiva.

Il rilievo topografico della zona interessata, a causa della sua sensibile estensione, si esegue generalmente col metodo fotogrammetrico e dovrà dare del terreno una rappresentazione completa, mediante linee di livello. Sulla carta dovranno inoltre essere ben visibili i vertici trigonometrici necessari per l'orientamento dei fotogrammi, i vertici trigonometrici ai quali si appoggiano le *poligonali nere* che collegano fra loro i capisaldi di riferimento, i capisaldi medesimi e qualsiasi altro punto possa essere utile come riferimento per i vertici della *poligonale rossa* da progettare.

Tutti questi punti dovranno naturalmente essere opportunamente custoditi anche sul terreno e di essi si darà una dettagliata descrizione nella relazione; in seguito saranno infatti utilizzati per trasferire la poligonale rossa del progetto esecutivo dal disegno sul terreno.

Supponendo quindi di avere questa carta a linee di livello della zona interessata (fig. 6.2/a), e di conoscere i punti *A* e *P* da collegare, nonché gli eventuali punti obbligati intermedi del tracciato (nel nostro esempio immagi-

niamo che non ve ne siano), si procede al disegno del tracciolino a pendenza uguale o inferiore alla massima consentita.

Poiché più tratti di questo tracciolino dovranno inoltre essere in seguito regolarizzati sostituendoli con tratti di rettilineo più corti del loro sviluppo complessivo, e poiché questi ultimi devono poi essere raccordati con curve che accorciano ulteriormente il percorso iniziale dell'insieme, facendo pertanto aumentare la pendenza dell'asse stradale, è opportuno fissare al tracciolino una pendenza fittizia leggermente inferiore a quella massima di progetto (generalmente di uno o due punti), in modo che quando la prima aumenterà si avvicinerà approssimativamente alla seconda.

Stabilita questa pendenza fittizia p , si calcola l'intervallo grafico i che consente di passare con un tratto unico dal punto A (supposto per semplicità su una linea di livello) al punto B della linea di livello a quota più alta, o al punto C della linea di livello a quota più bassa, con la medesima pendenza p . Se indichiamo con I l'intervallo reale, poiché per definizione la pendenza è uguale alla tangente dell'angolo di inclinazione, si ha:

$$p = \tan \alpha = \frac{e}{I}$$

essendo e l'equidistanza altimetrica fra linee di livello successive. E poiché:

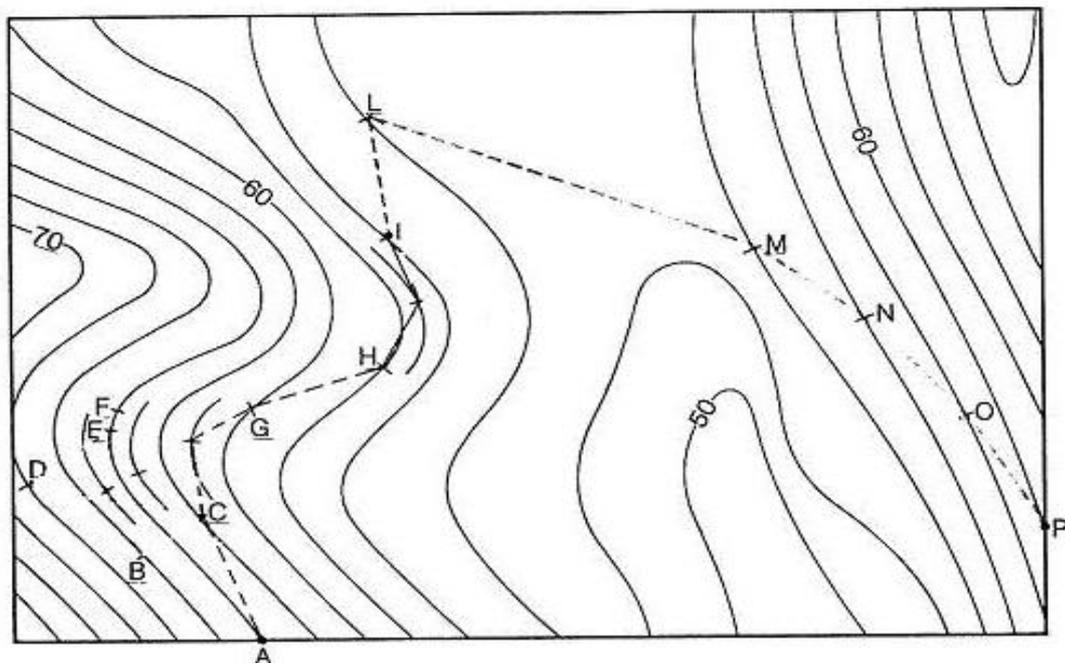
$$I = i \cdot n$$

essendo n il denominatore della scala del disegno, sarà:

$$p = \frac{e}{i \cdot n}$$

$$i = \frac{e}{p \cdot n}$$

Figura 6.2/a Tracciolina a pendenza non maggiore alla massima prefissata



Le soluzioni possibili sono quindi due ($A-B$ ovvero $A-C$), e ambedue si individuano facilmente facendo centro in A con apertura di compasso uguale ad i e intersecando rispettivamente in B e C le due linee di livello che precedono e seguono quella passante per A .

Similmente da B si rendono possibili le due soluzioni $B-D$ o $B-E$, e da C le altre due $C-F$ o $C-G$.

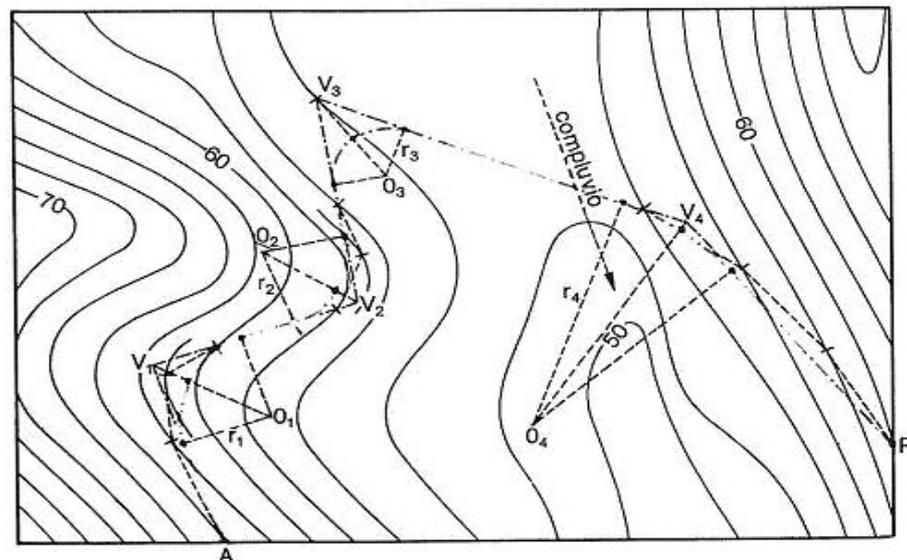
Quando poi un tratto di tracciolino tende a tagliare la stessa linea da cui parte, prima di incontrare la successiva (come accade ad es. per $B-E$ e $C-F$, e in seguito anche per $H-I$), si può interpolare nella striscia interessata un'altra linea, dimezzando anche l'intervallo i del tracciolino per non modificare il valore della pendenza.

Ciò accade quando il terreno è molto accidentato (linee di livello troppo vicine), o quando la pendenza massima assegnata al tracciato è troppo piccola (tratti del tracciolino troppo grandi). Se non si eseguisse questa interpolazione si otterrebbe infatti un tratto di tracciolino sensibilmente discosto dalla superficie fisica del terreno, e, se la strada seguisse lo stesso percorso, la sua costruzione richiederebbe un sensibile sterro (o una galleria) oppure un forte riporto (o anche un ponte).

Ovviamente fra le diverse soluzioni possibili ($A-B-D$, $A-B-E$, $A-C-F$, $A-C-G$) si sceglierà quella che conduce al punto di arrivo P nel modo più diretto e col tracciato più breve e regolare (nel nostro caso $A-C-G-H-I-L-M-N-O-P$); ma non sempre il tracciato più conveniente è manifestamente unico, e il progettista dovrà scegliere fra più soluzioni tutte ugualmente accettabili.

Quando non si riesce a intersecare la linea successiva con l'intervallo di tracciolino i calcolato perché questa è alquanto lontana, come accade per il tracciolino $A-C-G-H-I-L$ nel punto L , è lecito allungare l'intervallo stesso (in figura $L-M$), riducendo così in quel tratto la pendenza, purché si segua però un percorso diretto al punto di arrivo P . Perché si raggiunga esattamente questo punto, è anche consigliabile partire in senso inverso da P verso A (percorso $P-O-N-M$), per incontrare in L il tracciolino precedente $A-C-G-H-I-L$.

Figura 6.2/b Poligonale d'asse e asse stradale

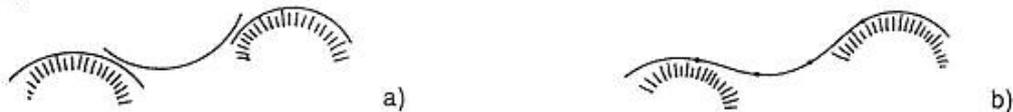


La pendenza del tracciolino complessivo è quindi costante, e pari al valore massimo convenzionale p , solo per larga parte del tracciato; in alcuni tratti può infatti essere inferiore, per esigenze orografiche. Ciò è anche largamente confermato da numerosi esempi di strade di collina o montagna già esistenti, nelle quali spesso si osserva che la pendenza si riduce per lunghi tratti a valori bassissimi, anche se esse portano nel complesso a superare sensibili dislivelli.

Come precedentemente detto, scelto il tracciolino planimetricamente più conveniente, bisogna successivamente sostituirlo con la **poligonale d'asse** $AV_1V_2V_3V_4P$ (fig. 6.2/b) – da disegnare in rosso come il primo – per allungare i rettilinei e ridurre il numero delle curve. La lunghezza del nuovo percorso risulterà conseguentemente minore del precedente e la pendenza aumenterà; inoltre i nuovi rettilinei non si adatteranno più alla superficie naturale del terreno, come il precedente tracciolino, e daranno luogo a sterri e riporti. Si può così comprendere come ogni miglioramento planimetrico comporti un peggioramento altimetrico e un aumento dei costi di costruzione. Toccherà al progettista, con la sua sensibilità ed esperienza, equilibrare giustamente questi fattori discordanti.

Quando si hanno *diverse curve circolari vicine fra loro*, secondo criteri moderni di progettazione, una volta disegnate sulla planimetria le curve stesse con raggio non inferiore a quello previsto e la cui reciproca posizione garantisce il migliore adeguamento del tracciato al terreno, si tende a raccordarle direttamente con altre curve a raggio variabile (fig. 6.3), senza l'interposizione di tratti rettilinei, al fine di eliminare le discontinuità e rendere il tracciato medesimo complessivamente più scorrevole.

Figura 6.3 Metodo moderno di progettazione dell'asse stradale, nei tratti con curve circolari vicine fra loro.



6.6 Tracciamento diretto sul terreno

Si può effettuare solo nel caso di strade di modesta lunghezza e con terreni collinosi o montagnosi o comunque molto accidentati, adottando un clisigonometro o un tacheometro.

Col **clisigonometro**, posto lo strumento in stazione sul punto di partenza e rettificato, si impone al cannocchiale la pendenza p e si misura l'altezza strumentale h . Quindi si fa spostare a tentativi una stadia sul terreno, fino a trovare quei punti per cui si faccia su di essa la lettura $l=h$. Naturalmente anche ora, come nel tracciamento su carta, si dovrà scegliere fra questi punti quello più conveniente (i criteri sono sempre gli stessi: percorso più regolare e più diretto verso il punto di arrivo), quindi si disporrà lo strumento nella nuova posizione per procedere ulteriormente in modo analogo.

In seguito si rettifica questo percorso osservandolo direttamente sul terreno, per avere la poligonale d'asse; questa viene poi direttamente rilevata con lo stesso strumento, possibilmente chiudendola planimetricamente e altimetricamente per poterla compensare.

Col **tacheometro** si procede in modo analogo, imponendo al cannocchiale l'angolo zenitale φ per cui risulti $\cot \varphi = p$ e ricercando quei punti per cui si faccia sulla stadia la lettura $l=h$.

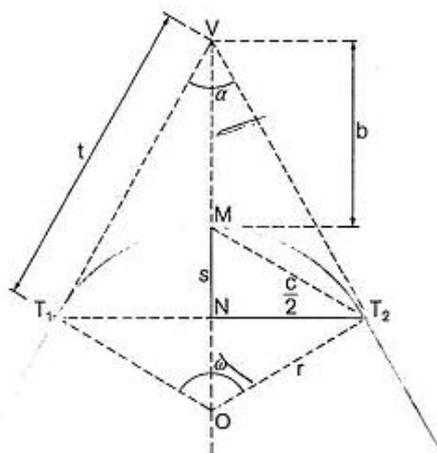
6.7 Curve circolari

Dedotta la poligonale d'asse $AV_1V_2V_3V_4P$ (fig. 6.2/b), occorre quindi studiare le curve tra i vari rettifili.

Queste sono generalmente circolari (vi sono però anche altri tipi che esporremo in seguito), e hanno raggi di curvatura legati alle caratteristiche orografiche del terreno, a quelle del traffico e alla velocità di progetto assunta per quella strada (ved. par. 5.14 e 5.15).

Un primo studio si effettua sulla carta (fig. 6.4), misurando gli elementi caratteristici già presenti e deducendone altri (angolo al vertice α , centro di curvatura O , raggio r , tangente t , angolo al centro ω , corda c , saetta s , bisettrice b , sviluppo l), con l'ausilio dei normali strumenti da disegno (doppio decimetro, compasso, rapportatore). Appena possibile, è bene però verificare le misure grafiche fondamentali (angolo al vertice α e tangente t) con misure dirette fatte sul terreno, certamente più precise, apportando alle prime le necessarie correzioni.

Figura 6.4 Elementi delle curve circolari.



Fra i vari *elementi della curva* esistono poi le seguenti relazioni analitiche, generalmente ottenute in funzione di ω ed r , oppure in funzione di α e t .

A) In funzione di ω ed r

- **angolo al centro:**

$$\omega^\circ = 180^\circ - \alpha^\circ, \quad \text{oppure: } \omega^c = 200^c - \alpha^c \quad (6.1)$$

- **tangente:**

$$t = r \tan \frac{\omega}{2} \quad (6.2)$$

- **corda:**

$$\frac{c}{2} = r \sin \frac{\omega}{2}, \quad \text{da cui: } c = 2r \sin \frac{\omega}{2} \quad (6.3)$$

- **saetta:**

$$s = r - NO = r - r \cos \frac{\omega}{2}, \quad \text{da cui: } s = r \left(1 - \cos \frac{\omega}{2} \right) \quad (6.4)$$

espressione che può essere resa logaritmica con la seguente formula di bisezione:

$$\operatorname{sen} \frac{\omega}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \omega}{2}}, \quad \text{cioè: } 2 \operatorname{sen}^2 \frac{\omega}{2} = 1 - \cos \omega$$

e, ponendo $\frac{\omega}{2}$ al posto di ω , si ha:

$$2 \operatorname{sen}^2 \frac{\omega}{4} = 1 - \cos \frac{\omega}{2}, \quad \text{da cui: } s = 2r \operatorname{sen}^2 \frac{\omega}{4} \quad (6.4')$$

• **bisettrice:**

$$b = VO - r = \frac{r}{\cos \frac{\omega}{2}} - r, \quad \text{da cui: } b = r \left(\frac{1 - \cos \frac{\omega}{2}}{\cos \frac{\omega}{2}} \right) \quad (6.5)$$

e per la succitata formula di bisezione:

$$b = \frac{2r \operatorname{sen}^2 \frac{\omega}{4}}{\cos \frac{\omega}{2}} \quad (6.5')$$

• **sviluppo:**

$$l = r \omega^{\text{rad}} = r \frac{\pi}{180^\circ} \omega^0, \quad \text{oppure:} \quad (6.6)$$

$$l = r \omega^{\text{rad}} = r \frac{\pi}{200^\circ} \omega^c \quad (6.6')$$

B) In funzione di α e t

• **raggio:**

$$r = t \tan \frac{\alpha}{2} \quad (6.7)$$

• **corda:**

$$\frac{c}{2} = t \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}, \quad \text{da cui: } c = 2t \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \quad (6.8)$$

• **saetta:**

ponendo nelle (6.4) e (6.4') le (6.1) e (6.7), si ha rispettivamente:

$$s = t \tan \frac{\alpha}{2} \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \right) \quad (6.9)$$

$$s = 2t \tan \frac{\alpha}{2} \operatorname{sen}^2 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{4} \right) \quad (6.9')$$

• **bisettrice:**

ponendo nelle (6.5) e (6.5') le (6.1) e (6.7), si ha rispettivamente:

$$b = t \tan \frac{\alpha}{2} \left(\frac{1 - \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (6.10)$$

$$b = \frac{2t \tan \frac{\alpha}{2} \operatorname{sen}^2 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{4} \right)}{\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}} \quad (6.10')$$

• **sviluppo:**

ponendo nelle (6.6) e (6.6') le (6.1) e (6.7), si ha rispettivamente:

$$l = t \tan \frac{\alpha^\circ}{2} \frac{\pi}{180^\circ} (180^\circ - \alpha^\circ) \quad (6.11)$$

$$l = t \tan \frac{\alpha^c}{2} \frac{\pi}{200^c} (200^c - \alpha^c) \quad (6.11')$$

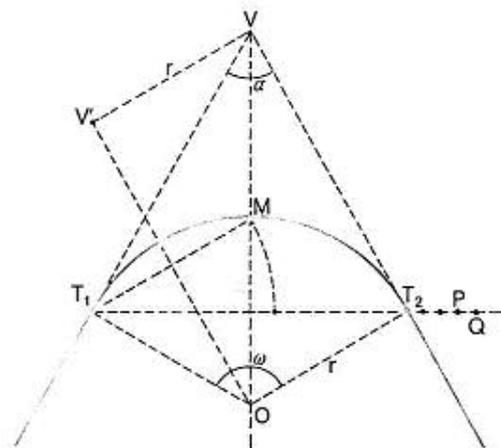
Una volta fissato il valore del raggio r , il *tracciamento della curva sulla carta* (fig. 6.5) si può effettuare segnando la bisettrice dell'angolo al vertice α , portando nel vertice V un segmento $VV' = r$ perpendicolare a uno dei due rettili e conducendo infine da V' la parallela al suddetto rettilo fino a incontrare la bisettrice nel centro O della curva.

Abbassando dal punto O le perpendicolari ai due rettili, si ottengono i due punti di tangenza T_1 e T_2 ; facendo centro in O e con apertura di compasso uguale ad r si può quindi disegnare il raccordo.

Per determinare con una certa approssimazione *graficamente lo sviluppo l della curva* (fig. 6.5), si può usare la seguente costruzione. Tracciata la corda T_1T_2 e prolungata la sua direzione all'esterno dei punti di tangenza, verso destra o verso sinistra, si riporta su essa il doppio valore dell'altra corda $T_1M = MT_2$ relativa a metà arco, per es. si pone:

$$T_1P = 2T_1M = 2MT_2$$

Figura 6.5 - Tracciamento di una curva circolare sulla carta e determinazione grafica del suo sviluppo



Essendo:

$$T_1P > T_1T_2$$

si determinerà la terza parte della differenza di questi segmenti, cioè:

$$PQ = \frac{1}{3} (T_1P - T_1T_2) = \frac{1}{3} T_2P$$

e la si riporterà oltre il punto P . Lo sviluppo l della curva risulta praticamente uguale alla lunghezza del segmento T_1Q .

6.8 Misura dell'angolo in un vertice inaccessibile e posizione dei punti di tangenza

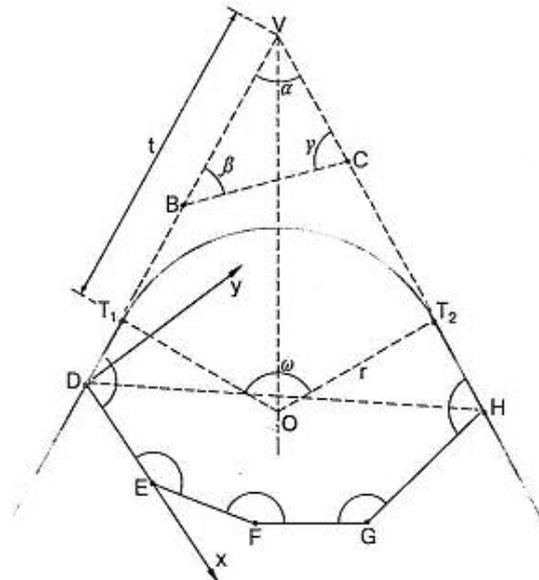
Nel paragrafo precedente abbiamo detto che è opportuno definire l'angolo al vertice α e le distanze t che fissano la posizione dei due punti di tangenza T_1 e T_2 con misure dirette fatte sul terreno (operazione che d'altronde s'impone nel caso di progettazione effettuata sullo stesso terreno, senza l'ausilio della carta).

Può però accadere che il vertice suddetto sia *inaccessibile* (fig. 6.6), il che accade abbastanza frequentemente su terreni accidentati, in quanto i rettili che convergono in esso devono essere raccordati prima del vertice medesimo. Allora queste misure potranno essere fatte solo *in modo indiretto*, col seguente procedimento.

Si prendono sui due rettili due punti B e C reciprocamente visibili, nei quali si fa quindi stazione con un goniometro e una stadia per misurare i seguenti elementi:

$$\widehat{VBC} = \beta, \quad \widehat{BCV} = \gamma, \quad BC$$

Figura 6.6 - Misura dell'angolo in un vertice inaccessibile e picchettamento dei punti di tangenza



Dal triangolo BVC si ottiene allora:

$$\alpha = 180^\circ - (\beta + \gamma)$$

$$BV = BC \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha}, \quad CV = BC \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

e la posizione dei punti di tangenza si può ricavare con le relazioni:

$$T_1B = t - BV, \quad T_2C = t - CV$$

Se non è possibile trovare due punti reciprocamente visibili, se ne prendono altri due D e H , collegandoli quindi con una poligonale $DEFGH$ della quale si misurano tutti i lati e tutti gli angoli.

Dal poligono chiuso $VDEFGH$ si deduce allora:

$$\alpha = 4 \cdot 180^\circ - (\hat{D} + \hat{E} + \hat{F} + \hat{G} + \hat{H})$$

mentre il calcolo della poligonale, riferita a un sistema di assi cartesiani con origine in D e con l'asse delle x coincidente col lato DE , porta alla determinazione del lato di chiusura DH e degli angoli \hat{VDH} e \hat{DHV} .

Dal triangolo DVH si ottiene quindi:

$$DV = DH \frac{\text{sen } \hat{DHV}}{\text{sen } \alpha}, \quad HV = DH \frac{\text{sen } \hat{VDH}}{\text{sen } \alpha}$$

e la posizione dei punti di tangenza si può ricavare con le relazioni:

$$T_1D = DV - t, \quad T_2H = HV - t$$

6.9 Curve circolari condizionate

Nota l'angolo al vertice α formato fra due rettili AV e BV sufficientemente lunghi, è teoricamente possibile attribuire al raggio del relativo raccordo circolare qualsiasi valore compatibile con le caratteristiche cinetiche (cioè riguardanti il moto) e di ingombro dei veicoli che dovranno percorrere quella curva. Se però essa è vincolata al rispetto di determinate condizioni geometriche, oltre a quella fondamentale che la vuole tangente agli stessi rettili, l'unico valore del raggio possibile sarà quello deducibile dalle relazioni analitiche che le stesse condizioni esprimono.

Vediamo di seguito i casi più significativi.

A) Curva circolare passante per un punto prefissato

Supposta già disegnata la curva di raggio incognito r (fig. 6.7), se P è il punto prefissato per il quale deve passare la curva stessa, noto mediante le coordinate polari VP e β riferite al polo V e all'asse polare VA , o mediante le corrispondenti coordinate cartesiane:

$$x_0 = VP \cos \beta, \quad y_0 = VP \sin \beta$$

con origine V e asse delle ascisse VA , applicando il teorema di Pitagora al triangolo $PP'O$, si ha:

$$PP'^2 + P'O^2 = r^2$$

Ma si ha anche:

$$PP' = t - x_0 = r \cot \frac{\alpha}{2} - x_0, \quad P'O = r - y_0$$

per cui, sostituendo queste espressioni nella precedente relazione pitagorica, si ottiene:

$$\left(r \cot \frac{\alpha}{2} - x_0\right)^2 + (r - y_0)^2 = r^2$$

e sviluppando, semplificando e ordinando si ha:

$$\begin{aligned} r^2 \cot^2 \frac{\alpha}{2} + x_0^2 - 2rx_0 \cot \frac{\alpha}{2} + r^2 + y_0^2 - 2ry_0 &= r^2 \\ \left(\cot^2 \frac{\alpha}{2}\right) r^2 - 2\left(x_0 \cot \frac{\alpha}{2} + y_0\right) r + (x_0^2 + y_0^2) &= 0 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Si ottiene così una *equazione di 2° grado*, la cui soluzione maggiore dà il raggio voluto, mentre la minore deve essere scartata perché rappresenta il raggio della circonferenza passante ancora per P e tangente ai due rettili, ma volgente la concavità verso il vertice V .

Figura 6.7 Curva circolare passante per un punto prefissato P .

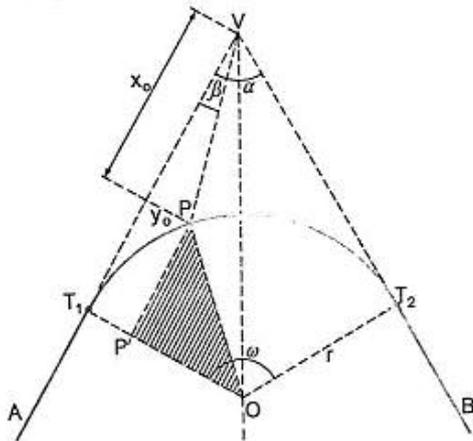
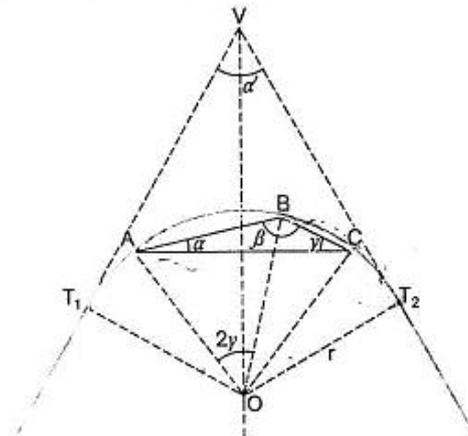


Figura 6.8 Curva circolare passante per tre punti prefissati A, B e C .



B) Curva circolare passante per tre punti prefissati

Supposto già disegnata la curva di raggio incognito r (fig. 6.8), se A, B, C sono i tre punti prefissati per i quali essa deve passare, noti mediante le rispettive coordinate oppure tre elementi del triangolo ABC (tra i quali vi sia almeno un lato), l'arco ABC apparterrà alla *circonferenza circoscritta* allo stesso triangolo e avente il raggio cercato.

Inoltre, per la nota proprietà degli angoli al centro e alla circonferenza che sottendono lo stesso arco, si potrà ad es. scrivere:

$$A\hat{C}B = \gamma, \quad A\hat{O}B = 2\gamma$$

Dal triangolo isoscele ABO si deduce allora:

$$\frac{AB}{2} = r \operatorname{sen} \gamma, \quad \text{cioè} \quad r = \frac{AB}{2 \operatorname{sen} \gamma} \quad (6.13)$$

e similmente si ottiene:

$$r = \frac{BC}{2 \operatorname{sen} \alpha} \quad (6.14)$$

$$r = \frac{CA}{2 \operatorname{sen} \beta} \quad (6.15)$$

Dal triangolo ABC si può inoltre ricavare la seguente espressione dell'area:

$$S = \frac{1}{2} BC \cdot CA \operatorname{sen} \gamma, \quad \text{da cui: } \operatorname{sen} \gamma = \frac{2S}{BC \cdot CA}$$

che sostituita nella (6.13), dà la seguente altra espressione del raggio:

$$r = \frac{AB \cdot BC \cdot CA}{4S} \quad (6.16)$$

C) Curva circolare tangente a tre rettili che si incontrano in due punti

Se i tre rettili da raccordare con un'unica curva circolare sono AV_1 , V_1V_2 , V_2B e V_1 , V_2 sono i loro due punti di incontro (fig. 6.9), il raccordo cercato è rappresentato dalla circonferenza ex-inscritta al triangolo VV_1V_2 che si ottiene prolungando i rettili AV_1 e BV_2 .

Supposti allora noti la lunghezza del rettilo centrale $V_1V_2 = l$ e gli angoli α_1 , α_2 nei due vertici V_1 , V_2 , indicando con S l'area del triangolo VV_1V_2 - deducibile da quella dei triangoli VV_1O , VV_2O , V_1V_2O - si deduce:

$$S = \frac{1}{2} VV_1 r + \frac{1}{2} VV_2 r - \frac{1}{2} l r$$

$$S = \frac{1}{2} r (VV_1 + VV_2 - l) = \frac{1}{2} r (VV_1 + VV_2 + V_1V_2 - 2l)$$

e, indicando con p il semiperimetro del triangolo VV_1V_2 , si ha:

$$S = \frac{1}{2} r (2p - 2l) = r (p - l)$$

da cui si ottiene in definitiva:

$$r = \frac{S}{p - l} \quad (6.17)$$

D) Curva circolare tangente a tre rettili che si incontrano in tre punti

Se i tre rettili da raccordare sono PV_1 , V_1V_2 , V_2P e P , V_1 , V_2 sono i loro punti di incontro, il primo dei quali dovendosi intendere come una intersezione a livello o sfalsata (fig. 6.10), il raccordo cercato è rappresentato dalla circonferenza inscritta al triangolo formato dagli stessi tre punti.

Supponendo allora di conoscere la lunghezza dei tre rettili, indicando con S l'area del triangolo V_1V_2P - deducibile da quelle dei triangoli V_1PO , PV_2O , V_2V_1O - si ottiene:

$$S = \frac{1}{2} V_1P \cdot r + \frac{1}{2} PV_2 \cdot r + \frac{1}{2} V_2V_1 \cdot r$$

$$S = \frac{1}{2} r (V_1P + PV_2 + V_2V_1) = \frac{1}{2} r (2p) = rp$$

e quindi in definitiva si ha:

Applicazioni
numeriche
pag. 395

$$r = \frac{S}{p} \quad (6.18)$$

nella quale S si può ricavare con la formula di Erone.

Figura 6.9 Curva circolare tangente a tre rettifici che si incontrano nei due punti V_1 e V_2 .

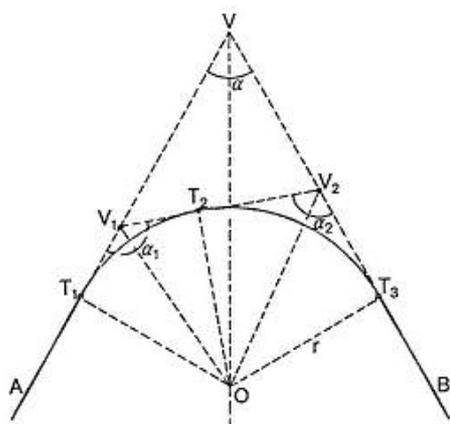
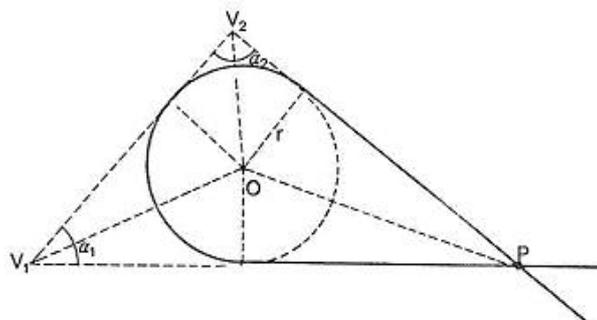


Figura 6.10 Curva circolare tangente a tre rettifici che si incontrano nei tre punti P , V_1 e V_2 .



6.10 Curve di ritorno o tornanti

Quando i rettifici LV ed MV formano nel vertice V un angolo α alquanto piccolo (fig. 6.11), come accade frequentemente su terreni accidentati, per inserire nel loro interno una curva circolare di raggio sufficiente, bisognerebbe allontanarla sensibilmente dal vertice.

Questa operazione potrebbe essere però praticamente impossibile per uno dei seguenti tre motivi:

- i rettifici non sono abbastanza lunghi;
- la posizione dei relativi punti di tangenza T_1 e T_2 interferisce con i punti di tangenza di un'altra curva che precede o segue;
- nella curva da inserire la pendenza aumenta sensibilmente, assumendo dei valori proibitivi, a causa della notevole riduzione dello sviluppo in curva rispetto al percorso lungo le due tangenti T_1V e VT_2 (non si dimentichi infatti che la pendenza p prefissata nel tracciolino è garantita con approssimazione solo lungo quest'ultimo percorso).

In questo caso si inserisce fra i due rettifici una curva esterna detta **curva di ritorno** o **tornante**, da raccordare poi opportunamente agli stessi rettifici con altre due curve. Per far questo, si costruisce la bisettrice dell'angolo al vertice V e, con apertura di compasso uguale al **raggio minimo di svolta** ($r = 15 + 20$ m), si traccia una circonferenza con centro in un punto della stessa bisettrice. In particolare il centro O può essere:

Figura 6.11 Tornante con centro O esterno all'angolo \hat{V} .

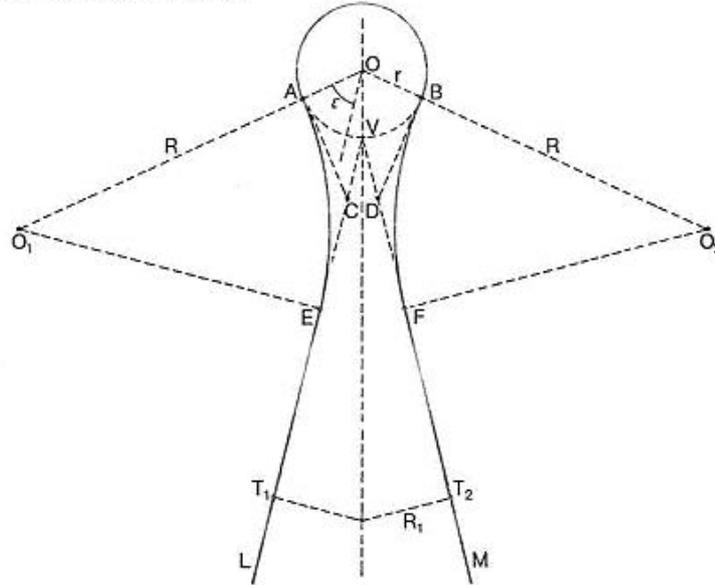


Figura 6.12 Tornante con centro O sul vertice dell'angolo \hat{V} .

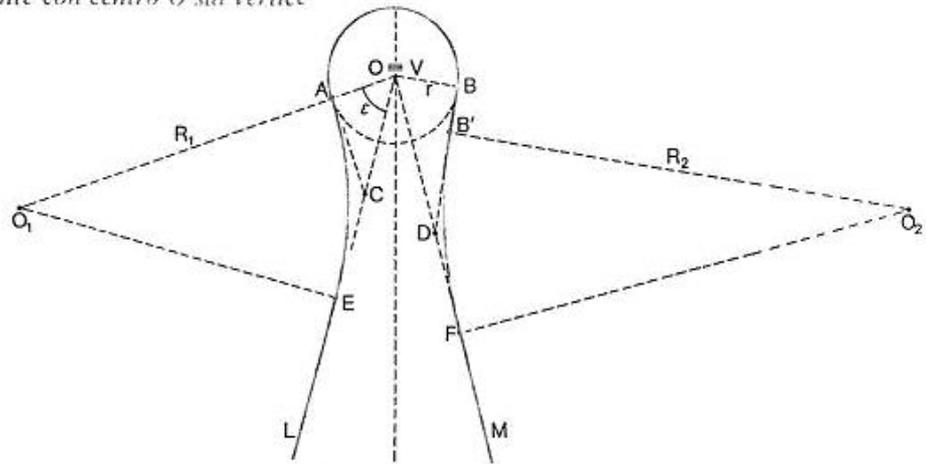
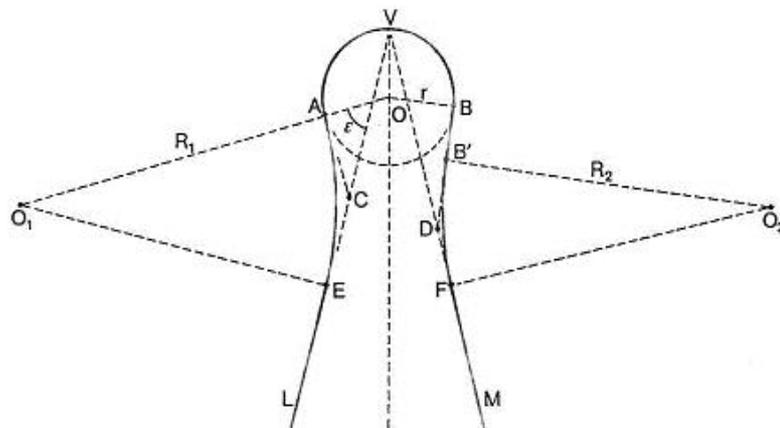


Figura 6.13 Tornante con centro O interno all'angolo \hat{V} .



- esterno all'angolo (fig. 6.11);
- sul vertice V dell'angolo (fig. 6.12);
- interno all'angolo (fig. 6.13).

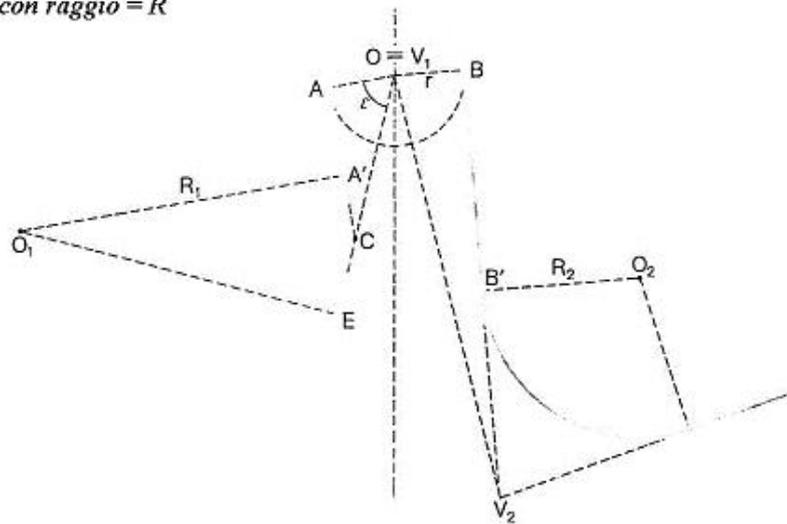
Condotte quindi da O due direzioni OA , OB formanti con i rettifili un angolo $\varepsilon = 30^\circ \div 60^\circ$, si tracciano in A e B le rispettive tangenti alla circonferenza, fino a incontrare in C e D i rettifili.

I segmenti AC e BD vengono quindi riportati sui rettifili, uguali rispettivamente a CE e DF . Le perpendicolari agli stessi rettifili in E ed F incontreranno allora le direzioni OA e OB nei centri O_1 e O_2 delle due curve di imbocco al tornante. È necessario che i raggi R di queste curve siano alquanto maggiori di quello assunto per il tornante ($R = 60 \div 90$ m circa); nel caso quindi il valore di R risultasse troppo piccolo, o anche piuttosto grande, dovrà essere ricondotto a grandezza accettabile variando l'ampiezza dell'angolo ε .

Il tornante non deve essere necessariamente simmetrico rispetto alla bisettrice dell'angolo al vertice; si può inoltre, molto opportunamente, inserire sui tratti AC e BD due brevi rettifili AA' , BB' (fig. 6.12 e 6.13), per seguire la buona regola che consiglia di evitare che a una curva segua immediatamente una controcurva. In tal caso i segmenti da riportare sui rettifili sono $A'C$ e $B'D$, essendo $A'C = CE$ e $B'D = DF$; il resto della costruzione procede poi come nel caso precedente.

È anche possibile eliminare completamente una o ambedue le curve di imbocco al tornante (fig. 6.14), sostituendo i rettifili che dovevano raccordarsi con esso mediante gli allineamenti uscenti dai vertici precedente o seguente e tangenti allo stesso tornante.

Figura 6.14 Tornante con una sola curva d'imbocco con raggio $= R$



6.11 Curve circolari bicentriche

Siano AV e BV i due rettifili formanti fra loro l'angolo α ; quando non è possibile disporre i punti di tangenza T_1 e T_2 a uguale distanza dal vertice V - ad es. per la presenza di qualche ostacolo - e quindi non si può imporre la condizione geometrica $t_1 = t_2$ valida per le curve circolari monocentriche, si possono raccordare i due punti di tangenza con una curva circolare bicentrica.

Questa è costituita da due archi di circonferenza contigui con centri O_1 , O_2 , raggi $r_1 \neq r_2$ e tangenti $t_1 \neq t_2$. I cinque elementi caratterizzanti la curva, cioè α , t_1 , t_2 , r_1 , r_2 , non possono però essere presi liberamente, essendo legati reciprocamente da condizioni geometriche e analitiche che fanno dipendere ciascuno di essi dagli altri quattro, inoltre i valori minori della tangente e del raggio sono sempre dalla stessa parte, così come quelli maggiori.

Fissando ad es. i primi quattro elementi e nell'ipotesi che sia $t_1 < t_2$ ed $r_1 < r_2$ (fig. 6.15), si può dedurre il quinto elemento r_2 con la seguente costruzione.

Stabilita la prima tangente $VT_1 = t_1$ sul rettilineo AV , si riporta in T_1 il segmento $T_1O_1 = r_1$ perpendicolarmente allo stesso rettilineo e in modo che non oltrepassi la bisettrice dell'angolo α .

Successivamente si fissa la seconda tangente $VT_2 = t_2$ con $t_2 > t_1$ e sulla perpendicolare in T_2 al rettilineo BV si porta il segmento $CT_2 = r_1$. Si unisce O_1 con C e si traccia nel punto medio D del segmento O_1C la perpendicolare al segmento stesso (asse del segmento); il punto di intersezione O_2 fra questo asse e la precedente perpendicolare in T_2 al rettilineo BV è il centro della curva di raggio r_2 .

Per avere il punto di raccordo E fra i due archi, si prolunga la congiungente O_2O_1 oltre il punto O_1 ; quindi si fa centro in O_1 per tracciare il primo arco T_1E e in O_2 per tracciare il secondo arco ET_2 .

Anche nell'ipotesi che sia $t_1 > t_2$ ed $r_1 > r_2$ (fig. 6.16), il raggio r_2 si determina con la stessa costruzione precedente. Fissata infatti la prima tangente $VT_1 = t_1$, si riporta in T_1 il segmento $T_1O_1 = r_1$ perpendicolarmente al rettilineo AV e in modo che oltrepassi la bisettrice dell'angolo α .

Poi si fissa la seconda tangente $VT_2 = t_2$ con $t_2 < t_1$ e sulla perpendicolare in T_2 al rettilineo BV si porta il segmento $CT_2 = r_1$. Si traccia l'asse del segmento

Figura 6.15 curva circolare bicentrica con $t_1 < t_2$ ed $r_1 < r_2$

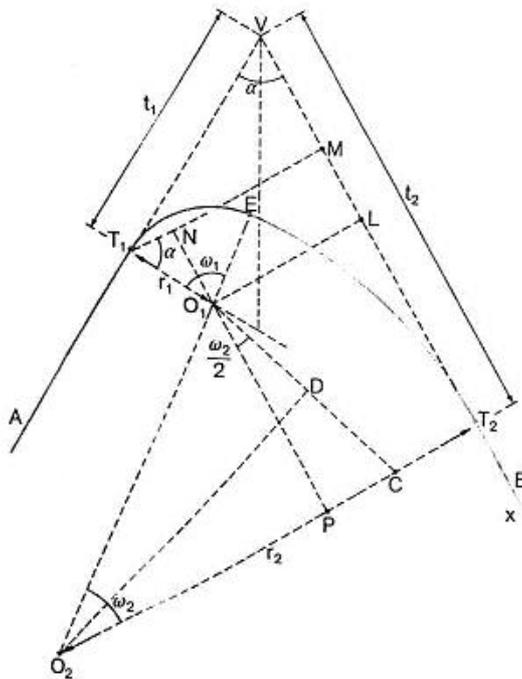
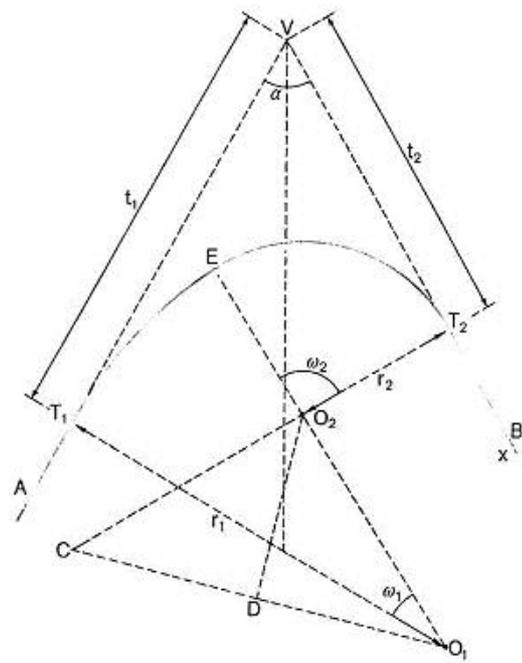


Figura 6.16 Curva circolare bicentrica con $t_1 > t_2$ ed $r_1 > r_2$



O_1C e si determina il suo punto di intersezione O_2 con la perpendicolare condotta in T_2 al rettilineo BV . I due archi di centro O_1 ed O_2 si raccordano infine nel punto E dell'allineamento O_1O_2 .

Le due costruzioni precedenti possono essere anche tradotte in un *procedimento analitico* che descriviamo sulla figura 6.15.

Introdotta un sistema di riferimento cartesiano con origine in V e asse delle ascisse coincidente con il rettilineo BV , si determinano le coordinate del primo centro O_1 mediante le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x_1 &= VL = VM + NO_1 = t_1 \cos \alpha + r_1 \sin \alpha \\y_1 &= O_1L = T_1M - T_1N = t_1 \sin \alpha - r_1 \cos \alpha\end{aligned}$$

Mandata quindi da O_1 la perpendicolare O_1P ad O_2T_2 e considerato il triangolo rettangolo PO_1C , nel quale $\widehat{PO_1C} = \omega_2/2$, si ha:

$$\begin{aligned}PC &= y_1 - r_1 \\PO_1 &= t_2 - x_1, \quad \text{e quindi:} \\ \frac{\omega_2}{2} &= \text{INV}^{\tan} \frac{PC}{PO_1}\end{aligned}$$

Infine si ha:

$$r_2 = CT_2 + CO_2 = CT_2 + O_1O_2, \quad \text{cioè:}$$

$$r_2 = r_1 + \frac{PO_1}{\sin \omega_2}$$

Applicazioni
numeriche
pag. 396

6.12 Curve paraboliche

I raccordi costituiti da curve circolari monocentriche si innestano ai due rettilinei direttamente nei punti di tangenza T_1 e T_2 , con l'inconveniente di far variare la forza centrifuga che sollecita trasversalmente i veicoli in moto da zero (sul rettilineo) a $m \cdot v^2/r$ (in curva), essendo m la massa del veicolo, v la sua velocità ed r il raggio della curva circolare. E questa brusca variazione della forza centrifuga, che può compromettere la stabilità del veicolo, si verifica anche nelle curve bicentriche in corrispondenza del punto di raccordo E fra le due curve di raggi r_1 ed r_2 .

Un raccordo che permette invece una graduale variazione della forza centrifuga, eliminando quindi i pericoli suddetti, è la **curva parabolica**, la quale può essere inoltre tracciata indifferentemente sia a *tangenti uguali*, sia a *tangenti disuguali*.

Per costruirla graficamente si può usare il **metodo per tangenti** (fig. 6.17), che consiste nel trovare i punti medi C e D delle due tangenti T_1V e T_2V e successivamente il punto medio E della congiungente CD ; il segmento CD sarà allora una tangente alla parabola nel punto E . Analogamente, congiungendo il punto medio F di CE col punto medio G di T_1C , si ottiene una nuova tangente alla parabola nel punto di mezzo H . E così anche, congiungendo il punto medio I di ED col punto medio L di T_2D , si ottiene un'altra tangente alla parabola nel punto di mezzo M . In modo identico si trovano altri punti; quelli da noi trovati, comprendendo anche i punti di tangenza, sono nell'ordine T_1, H, E, M, T_2 .

Col metodo per intersezioni (fig. 6.18), si congiungono i due punti di tangenza T_1, T_2 e si trova il punto medio N della corda T_1T_2 . Congiungendo N con V , il punto medio M del segmento NV appartiene alla parabola. Per ottenere altri punti, si dividono i segmenti NM ed MV in un identico numero di parti fra loro uguali, i cui punti di divisione vanno successivamente enumerati progressivamente e in senso inverso. Nell'intersezione delle congiungenti i due punti di tangenza con coppie di numeri uguali, si trovano altrettanti punti della parabola.

Fig. 6.17 *Costruzione grafica di una curva parabolica col metodo per tangenti*

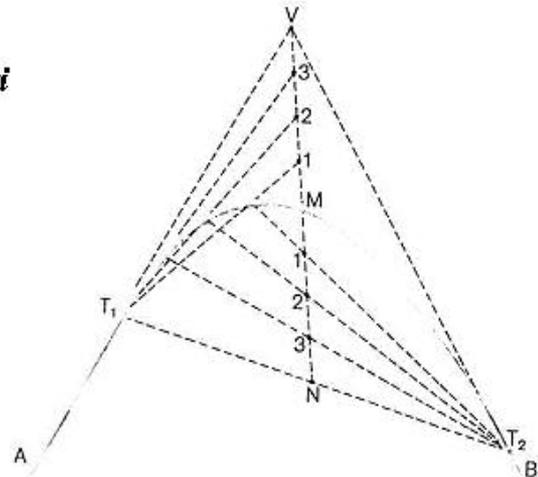
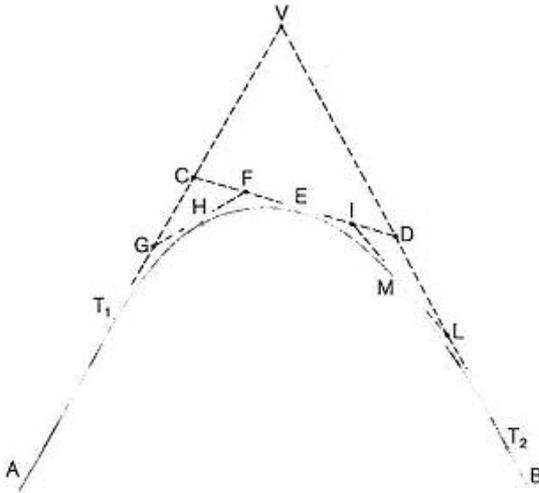
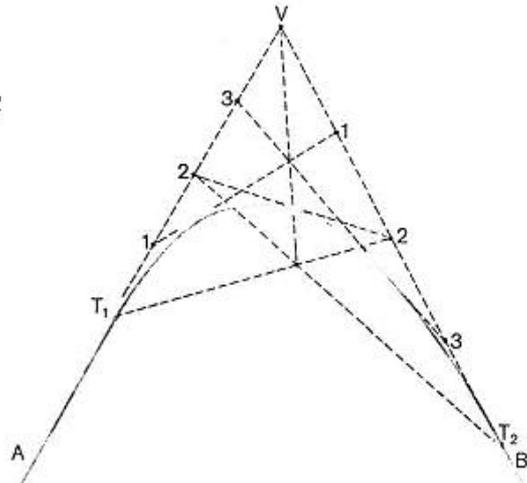


Fig. 6.18 *Costruzione grafica di una curva parabolica col metodo per intersezioni*

Fig. 6.19 *Costruzione grafica di una curva parabolica col metodo di inviluppo*



Col metodo per inviluppo (fig. 6.19), divise le due tangenti T_1V e T_2V in un identico numero di parti fra loro uguali, i cui punti di divisione vanno numerati progressivamente e in senso inverso, si congiungono le diverse coppie di numeri uguali, ottenendo così tante tangenti che inviluppano la parabola. Se inoltre si vogliono trovare i punti della parabola, si congiungono i due punti di tangenza T_1 e T_2 con coppie di numeri uguali (per es. T_12 e T_22) e i loro punti di intersezione si uniscono quindi con V ; queste congiungenti intersecano le precedenti che collegavano in coppia i numeri uguali delle tangenti (nel nostro esempio 2-2) in altrettanti punti della curva.

6.13 Profilo longitudinale

Una volta definito l'andamento planimetrico del tracciato stradale, è necessario fare anche uno studio altimetrico sul **profilo longitudinale del terreno** lungo l'asse della strada, detto pure **profilo nero** perché deve essere disegnato in nero. Questo può essere teoricamente inteso come lo sviluppo sul foglio di carta della superficie cilindrica generata dal movimento, lungo l'asse stradale, di una verticale che trasla parallelamente a se stessa.

Lungo il tracciato a pendenza costante, il profilo longitudinale sarebbe apparso come una retta inclinata (a pendenza uniforme); lungo l'asse stradale esso appare invece costituito da una spezzata (fig. 6.20), perché il tracciato definitivo si discosta da quello preliminare.

Per costruire praticamente questa spezzata è necessario fissare sui rettili e le curve del tracciato planimetrico, mediante *picchetti d'asse*, tutti quei punti in cui il terreno cambia pendenza, cioè i punti di intersezione dell'asse stradale con le varie linee di livello. Ma è opportuno prendere anche i punti singolari delle curve, come quelli di tangenza e i vertici (punti di intersezione tra curva e bisettrice). Se poi alcuni picchetti sono troppo vicini, è comunque possibile eliminarne qualcuno; così come è possibile saltarne qualcuno anche quando la poligonale d'asse è in parte sovrapposta a un tracciato a pendenza costante e lungo quel tratto il profilo tende quindi a diventare rettilineo. Si badi, però, che il numero e la posizione dei picchetti d'asse sono condizionati anche dalle caratteristiche orografiche del terreno in senso trasversale all'asse stradale. A ogni picchetto corrisponderà infatti una *sezione trasversale*, e tanto la distanza fra due picchetti consecutivi che la natura e le dimensioni di due sezioni consecutive definiranno in seguito il volume del *solido stradale* compreso fra le sezioni stesse. Per una corretta determinazione di quest'ultimo, è necessario d'altronde che non siano eccessive le variazioni plano-altimetriche del terreno fra sezioni consecutive; ecco perché non è consigliabile eccedere nella riduzione del numero dei picchetti, e anzi, nei tronchi stradali delimitati da sezioni alquanto distanziate, è opportuno inserirne di nuove.

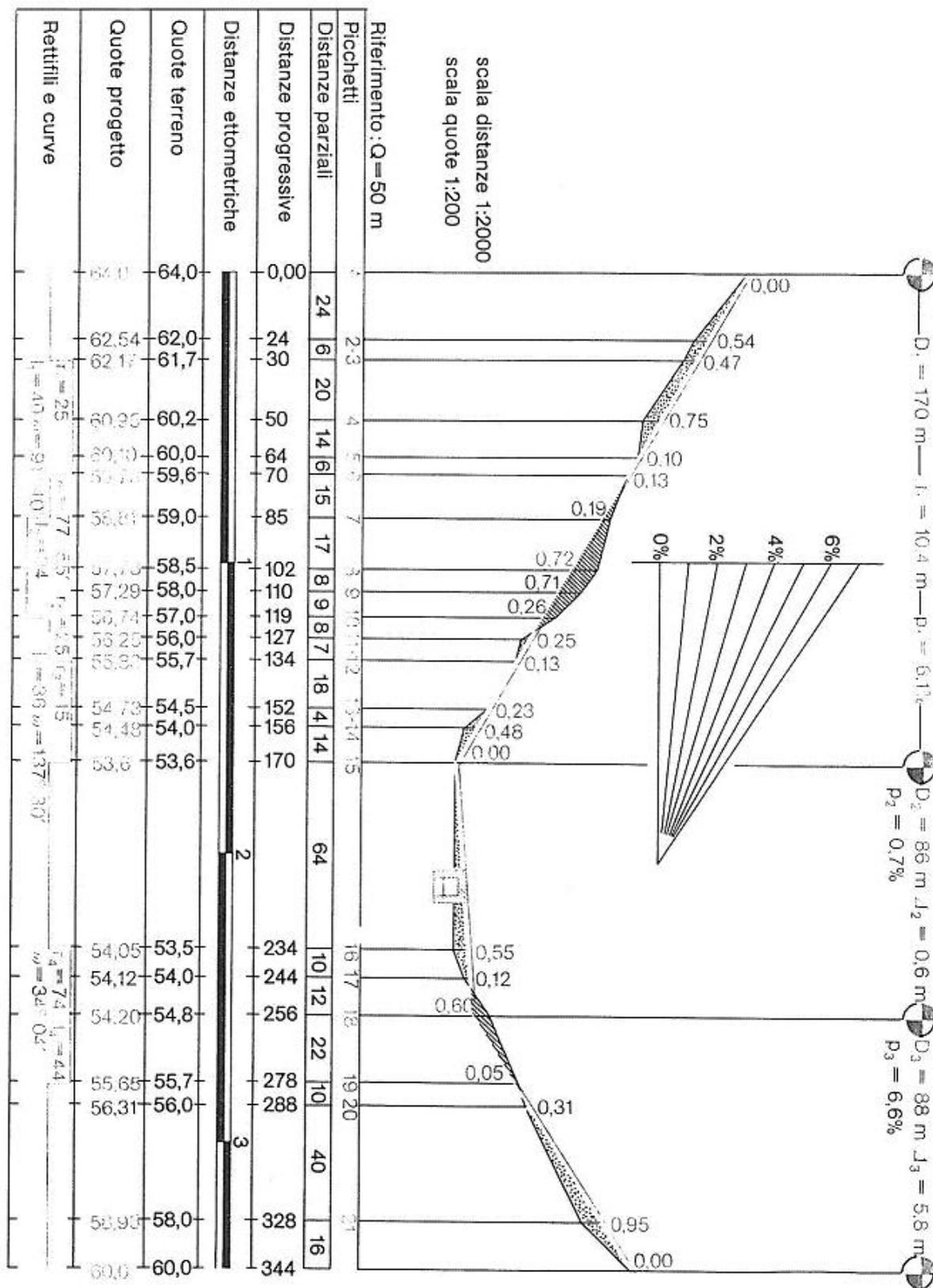
I picchetti d'asse e le sezioni relative vengono segnati in planimetria con dei punti ingrossati e con dei segmenti ortogonali all'asse stradale (nelle curve, diretti quindi verso il loro centro), enumerati progressivamente; trattandosi di elementi del progetto, *il colore è poi sempre il rosso*.

Preso quindi una orizzontale di riferimento, detta anche *linea azzurra* perché disegnata di regola in questo colore, alla quale si assegna una quota inferiore a quella del punto più basso del profilo, per garantire che esso si trovi tutto al di sopra della stessa, e assunta una *scala per le distanze* (generalmente quella stessa della planimetria) e una *scala per le quote* (generalmente decupla della precedente per esaltare le pendenze), si riportano le verticali corrispondenti alle varie sezioni, e su esse le quote relative. Congiungendo i punti superiori delle diverse ordinate, si ottiene il profilo longitudinale del terreno.

Nel riportare le distanze, è opportuno prendere quelle progressive (cioè riferite al punto d'origine), anziché quelle parziali (cioè relative a sezioni consecutive), per evitare il dannoso accumulo degli errori di graficismo e per impedire anche che un possibile errore materiale commesso nel riporto di una distanza possa compromettere la posizione di tutte le sezioni seguenti.

Per la sua irregolarità, il suddetto profilo longitudinale non può rappresentare altimetricamente l'andamento reale della strada da progettare; è quindi necessario regolarizzare il profilo nero, sostituendolo con una nuova spezzata a tratti più lunghi - detti *livellette* -, che prende il nome di **profilo di progetto** o **profilo rosso** (in quanto sulla carta deve essere *disegnato in rosso*). Questo

Figura 6.20 Profilo longitudinale



secondo profilo si sovrappone al primo, per meglio evidenziare i suoi caratteri peculiari (distanze, dislivelli e pendenze fra i vari punti) in relazione alle analoghe caratteristiche del precedente. Le diverse livellette si troveranno allora in parte al di sopra e in parte al di sotto del profilo nero, e potranno intersecarlo in alcuni punti detti *punti di passaggio*, mentre le aree comprese fra i due profili corrisponderanno a volumi di sterro o di riporto (da colorare rispettivamente *in giallo e in rosso*), a seconda che il profilo rosso passi al di sotto o al di sopra di quello nero.

Per una corretta, economica e funzionale progettazione della strada, è necessario però studiare queste livellette con estrema cura; i criteri da seguire sono i seguenti:

- le livellette devono discostarsi il meno possibile dal profilo nero, dando luogo a una compensazione almeno approssimativa fra le aree di sterro e quelle di riporto, per ridurre al massimo i movimenti di terra. Esiste però, come vedremo in seguito, anche la possibilità di eseguire in merito un calcolo analitico rigoroso, che non garantisce però ugualmente la perfetta uguaglianza dei volumi di sterro e di riporto, essendo questi influenzati anche dalle caratteristiche orografiche del terreno in senso trasversale, non evidenziabili nel profilo longitudinale eseguito lungo l'asse stradale. In ogni caso, quando non sia possibile un compenso dei volumi, è sempre preferibile che lo scavo superi il riporto, perché è più facile reperire in zona le cave di deposito (per ragioni di costo, evidentemente questo ragionamento s'inverte se è necessario scavare in roccia);
- le livellette devono avere la massima lunghezza possibile, ma si deve anche evitare che quelle in salita siano talmente lunghe da creare rallentamento nel traffico;
- la pendenza di ciascuna livelletta deve rientrare nei limiti previsti nel tracciolino, con una maggiorazione di uno o due punti conseguente alla sostituzione dello stesso tracciolino con l'asse stradale;
- la pendenza delle livellette in curva deve essere di norma inferiore a quella in rettilineo, particolarmente nelle curve a piccolo raggio;
- i cambiamenti di pendenza devono avvenire preferibilmente nell'interno delle curve o, meglio ancora, nei punti di tangenza, per evitare l'effetto sgradevole del punto di incontro di due livellette nell'interno di un rettilineo;
- tra due livellette devono essere evitate le sensibili variazioni di pendenza, per non compromettere le sospensioni dei veicoli (nelle sacche), o ridurre la visibilità dei veicoli provenienti in senso contrario (sulle creste);
- ogni livelletta deve essere altimetricamente raccordata all'altra con una curva parabolica (par. 5.21) o eventualmente circolare a grandissimo raggio (par. 5.20);
- in corrispondenza dell'attraversamento di corsi d'acqua, quali fiumi e torrenti, la pendenza delle livellette deve essere quasi annullata, per consentire la costruzione di ponticelli e tombini.

Il disegno del profilo longitudinale (fig. 6.20) viene infine completato con i seguenti elementi numerici e grafici:

- **indicazione delle livellette (in rosso)**, con il loro numero progressivo, la lunghezza D , il dislivello Δ fra i due punti estremi e la pendenza $p = \Delta/D$. Generalmente questi elementi sono riportati nella parte più alta del disegno, fra due cerchietti divisi con due diametri ortogonali in quattro settori (da colorare alternativamente *in rosso*), che rappresentano i segnali posti agli estremi delle livellette stesse;

- **quote rosse (in rosso)**, cioè le differenze fra le quote di progetto q e le corrispondenti quote del terreno Q , scritte verticalmente in vicinanza delle livellette di progetto, al di sotto se di sterro, al di sopra se di riporto. Queste quote sono già evidenziate graficamente dai segmenti compresi fra i due profili sulle singole verticali, ma è consigliabile ricavarle dalla differenza numerica dei due valori dai quali esse dipendono ($r = q - Q$);
- **quota della orizzontale di riferimento riferita al livello medio del mare (in azzurro)**, da scrivere sulla linea azzurra. Se il profilo longitudinale non entra nell'altezza del foglio, si deve tagliarlo in una sezione, riprendendolo da una posizione più bassa, e la quota di riferimento naturalmente cambierà, diventando uguale a quella precedente aumentata della traslazione verticale fatta subire al profilo;
- **numero dei picchetti o delle sezioni (in rosso)**;
- **distanze parziali (in nero)**;
- **distanze progressive (in nero)**;
- **distanze ettometriche (in nero)**, accompagnate da una rappresentazione grafica costituita ad esempio da tre rette vicinissime, i cui intervalli vengono anneriti alternativamente ogni 100 metri;
- **quote del terreno (in nero)**;
- **quote di progetto (in rosso)**, dedotte, in ciascun tratto di livelletta a pendenza costante p , preferibilmente in funzione della quota iniziale q_0 e della distanza D_{k-0} fra il picchetto interessato k e quello O all'origine della livelletta in esame ($q_k = q_0 + p \cdot D_{k-0}$);
- **indicazione dei rettifili e delle curve (in rosso)**, mediante una retta orizzontale, in corrispondenza dei rettifili, e delle rientranze dal lato opposto alla posizione dei centri di curvatura dei raccordi, in corrispondenza delle curve. In queste rientranze si devono poi scrivere, sempre in rosso, i valori del raggio, dell'angolo al centro, dello sviluppo e della tangente di ciascun raccordo;
- **scala grafica delle pendenze (in nero)**, mediante la rappresentazione di una serie di direzioni a pendenza progressivamente crescente, che servono come elementi visivi di raffronto per la stima immediata della pendenza di qualsiasi tratto del profilo, facilitando anche lo studio delle livellette di progetto.

6.14 Punti di passaggio

Come precedentemente detto, sono quei *punti di intersezione fra il profilo del terreno e quello di progetto* che separano lo scavo dal riporto; essi sono quindi sempre compresi fra due sezioni consecutive aventi quote rosse di nome e segno contrari (sterro seguito da riporto, o viceversa).

Per il calcolo dei volumi di terra da spostare per realizzare la strada, può essere utile determinare la posizione dei punti di passaggio rispetto a uno dei picchetti fra i quali risultano compresi. Così se si vuole ad es. trovare la posizione del punto di passaggio P , compreso fra le sezioni A e B , mediante la sua distanza d_A dalla prima sezione (fig. 6.21), indicato con $A'B'$ il profilo del terreno, $A''B''$ quello di progetto ed r_A, r_B le quote rosse nelle sezioni stesse, dalla similitudine dei triangoli $A'PA''$ e $B'PB''$, si ha:

$$\frac{r_A}{r_B} = \frac{d_A}{d - d_A}, \quad \text{essendo } d \text{ la lunghezza del tronco } AB.$$

Componendo la precedente, si ha inoltre:

$$\frac{r_A}{r_A + r_B} = \frac{d_A}{d_A + d - d_A} = \frac{d_A}{d}, \quad \text{cioè in definitiva:}$$

$$d_A = \frac{r_A}{r_A + r_B} d \quad (6.19)$$

In modo analogo si può trovare, mediante la distanza $d_B = d - d_A$, la posizione del punto di passaggio P rispetto alla sezione B .

Nella (6.19) le quote rosse vanno prese sempre in **valore assoluto**, tanto se le pendenze del terreno e della livelletta sono concordi (come in figura), quanto se sono discordi. Se poi si desidera trovare la posizione di P in funzione della pendenza p_t del terreno e della pendenza p_l della livelletta, condotta per P la orizzontale $A'''B'''$ e considerati i due triangoli rettangoli $A'PA'''$ e $A''PA'''$, si potrà scrivere:

$$A'A''' = d_A \tan \alpha = d_A \cdot p_t, \quad A''A''' = d_A \tan \beta = d_A \cdot p_l$$

e sottraendo membro a membro:

$$A'A''' - A''A''' = d_A (p_t - p_l)$$

Ma si ha anche:

$$A'A''' - A''A''' = r_A$$

per cui si ottiene in definitiva:

$$r_A = d_A (p_t - p_l), \quad d_A = \frac{r_A}{p_t - p_l} \quad (6.20)$$

In modo analogo si può trovare, mediante la distanza $d_B = d - d_A$, la posizione di P rispetto a B .

Nella (6.20) le pendenze vanno prese sempre in **valore relativo**, per cui nel caso queste risultassero discordi, la differenza si trasformerà in una somma.

Figura 6.21 Punto di passaggio P fra l'area di riporto (a sinistra) e quella di sterzo (a destra).

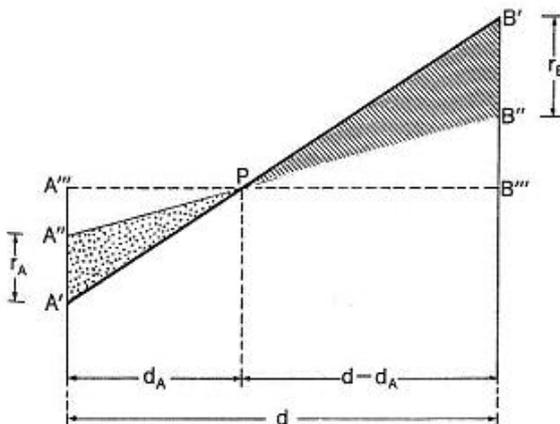
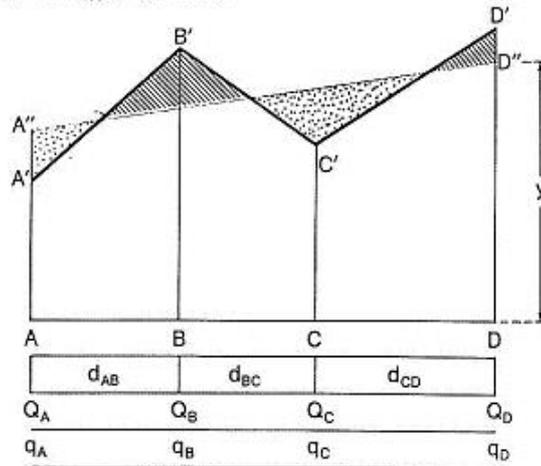


Figura 6.22 Liveletta di compenso $A''D''$, con quota q_A prefissata.



6.15 Livellette di compenso

È noto che uno dei criteri da seguire per sovrapporre il profilo rosso a quello nero è quello di scegliere le singole livellette di progetto in modo che diano compenso fra le aree di sterro e quelle di riporto. Questa condizione, che nella pratica viene sovente verificata solo con l'approssimazione di una osservazione diretta del disegno, può però anche essere garantita con un calcolo analitico seguendo uno dei procedimenti seguenti:

A) Fissata la quota di progetto q_A nel punto iniziale della livelletta $A''D''$ (fig. 6.22), determinare la quota di progetto $q_D = y$ all'altro estremo

Supposti noti tutti gli elementi del profilo del terreno, la livelletta cercata è quella che rende la sommatoria delle aree dei trapezi $ABB'A'$, $BCC'B'$, $CDD'C'$ equivalente a quella del trapezio $ADD''A''$.

E poiché si ha:

$$S_1 = \frac{1}{2} d_{AB} (Q_A + Q_B), \quad S_2 = \frac{1}{2} d_{BC} (Q_B + Q_C)$$

$$S_3 = \frac{1}{2} d_{CD} (Q_C + Q_D), \quad S = S_1 + S_2 + S_3$$

dovendo essere anche:

$$S = \frac{1}{2} D (q_A + y)$$

in cui $D = d_{AB} + d_{BC} + d_{CD}$, si deduce conseguentemente:

$$\frac{2S}{D} = q_A + y$$

$$y = \frac{2S}{D} - q_A \quad (6.21)$$

B) Fissata la pendenza p della livelletta $A''D''$ (fig. 6.23), determinare le quote di progetto $q_A = x$ e $q_D = y$ dei due suoi punti estremi

Oltre a dover essere verificata la condizione espressa nel problema precedente, che si esprime ora con la relazione:

$$S = \frac{1}{2} D (x + y), \quad \text{deve essere anche:}$$

$$\frac{y - x}{D} = p$$

Le due relazioni precedenti formano un sistema di 1° grado in due incognite, che converrà mettere nella forma seguente:

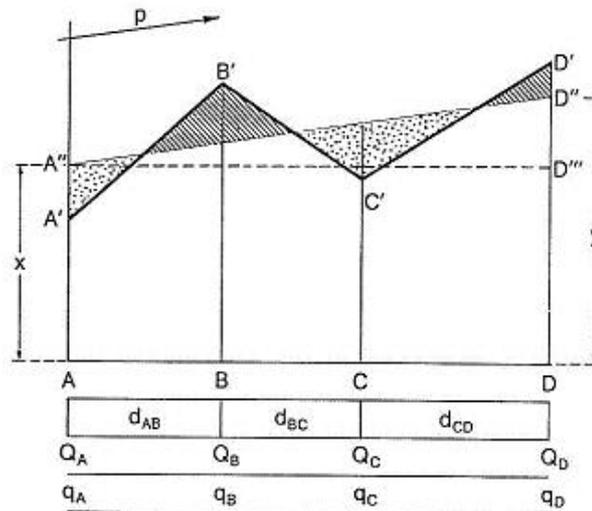
$$\begin{cases} \frac{1}{2} (x + y) = \frac{S}{D} \\ \frac{1}{2} (x - y) = -\frac{pD}{2} \end{cases}$$

Le due quote di progetto incognite si ricavano allora per somma e per sottrazione dei primi e dei secondi membri, cioè:

$$\begin{cases} x = \frac{S}{D} - \frac{pD}{2} \\ y = \frac{S}{D} + \frac{pD}{2} \end{cases} \quad (6.22)$$

Nel caso che il profilo di progetto sia costituito da un insieme di livellette, questo metodo – contrariamente a quello precedente – è applicabile solo a una di esse.

Figura 6.23 Livelletta di compenso $A''D''$, con pendenza p prefissata.



6.16 Sezioni trasversali

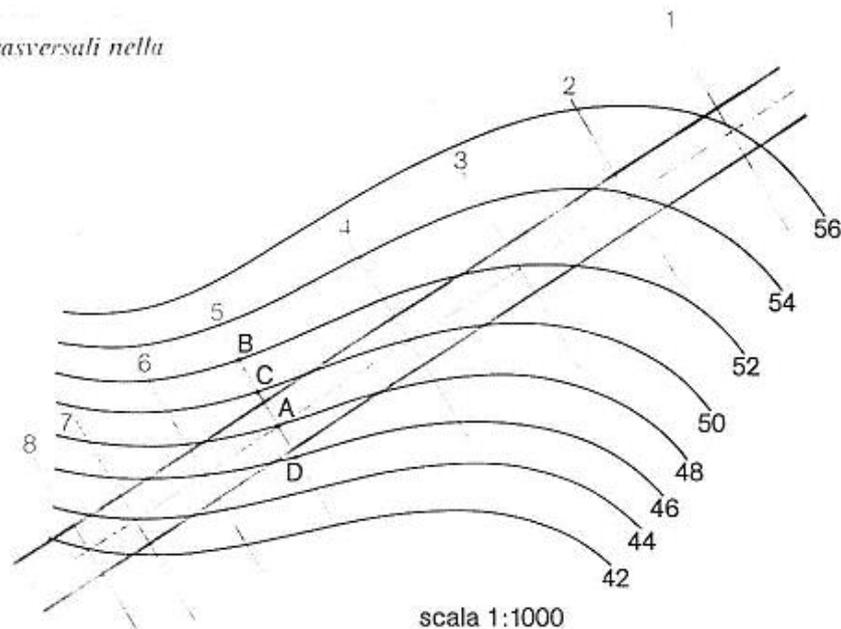
Rappresentano i **profili trasversali del terreno** (da disegnare *in nero*) e **quelli del corpo stradale** (da disegnare *in rosso*) effettuati ortogonalmente all'asse stradale in corrispondenza di ciascun picchetto d'asse ed eseguiti così come li vedrebbe un osservatore che si ponesse sul picchetto successivo volgendo le spalle ai picchetti che seguono. La prima sezione va cioè disegnata come si vedrebbe dal picchetto 2; la seconda come si vedrebbe dal picchetto 3; la terza come si vedrebbe dal picchetto 4, e così via.

Queste sezioni sono già segnate (in rosso) e progressivamente enumerate sulla planimetria (fig. 6.24), mediante dei segmenti di larghezza opportuna perpendicolari all'asse stradale che rappresentano le tracce dei piani verticali lungo i quali devono essere definiti i profili stessi; in corrispondenza dei raccordi circolari questi segmenti convergono poi verso il centro delle rispettive curve.

Per dare, però, anche la *rappresentazione altimetrica del terreno* lungo queste direzioni trasversali è necessario eseguire un rilevamento diretto sul terreno, con i procedimenti descritti nel 2° volume, oppure dedurre questo profilo dalla stessa planimetria, nel modo che ora esporremo.

I *profili trasversali del corpo stradale* richiederanno invece anche l'ausilio del profilo longitudinale, per dedurre la **quota rossa** in corrispondenza del relativo picchetto d'asse, nonché la definizione di tutti gli elementi progettuali inerenti alla sede stradale (numero di carreggiate, numero di corsie, larghezza di corsia, tipo e dimensioni delle cunette, pendenza delle scarpate, ecc.). Di questi elementi si è parlato diffusamente nel capitolo precedente.

Figura 6.24 Sezioni trasversali nella planimetria.



Volendo pertanto dedurre sulla stessa carta a linee di livello per esempio la sezione trasversale 5 in corrispondenza del picchetto *A* (fig. 6.24), si comincia coll'individuare i punti di intersezione *B*, *C*, *D* della traccia della sezione con le linee di livello che precedono e seguono immediatamente quella passante per *A*.

Note le quote (*ordinate*) di questi punti (sono quelle delle corrispondenti linee di livello, cioè 52, 50, 48, 46 m), e dedotte con un doppio decimetro le loro distanze dal picchetto d'asse *A* (*ascisse*), si prende una orizzontale di riferimento (*linea azzurra*) a quota leggermente inferiore a quella più bassa precedente (per es. 45 m) e si riportano i rispettivi valori delle ascisse e delle ordinate nella *stessa scala assunta per le quote* nel profilo longitudinale (1:100 o 1:200). Congiungendo i punti estremi delle varie ordinate, si ottiene il profilo *B'C'A'D'* del terreno in esame (fig. 6.25) e l'andamento altimetrico appare nel disegno come è nella realtà.

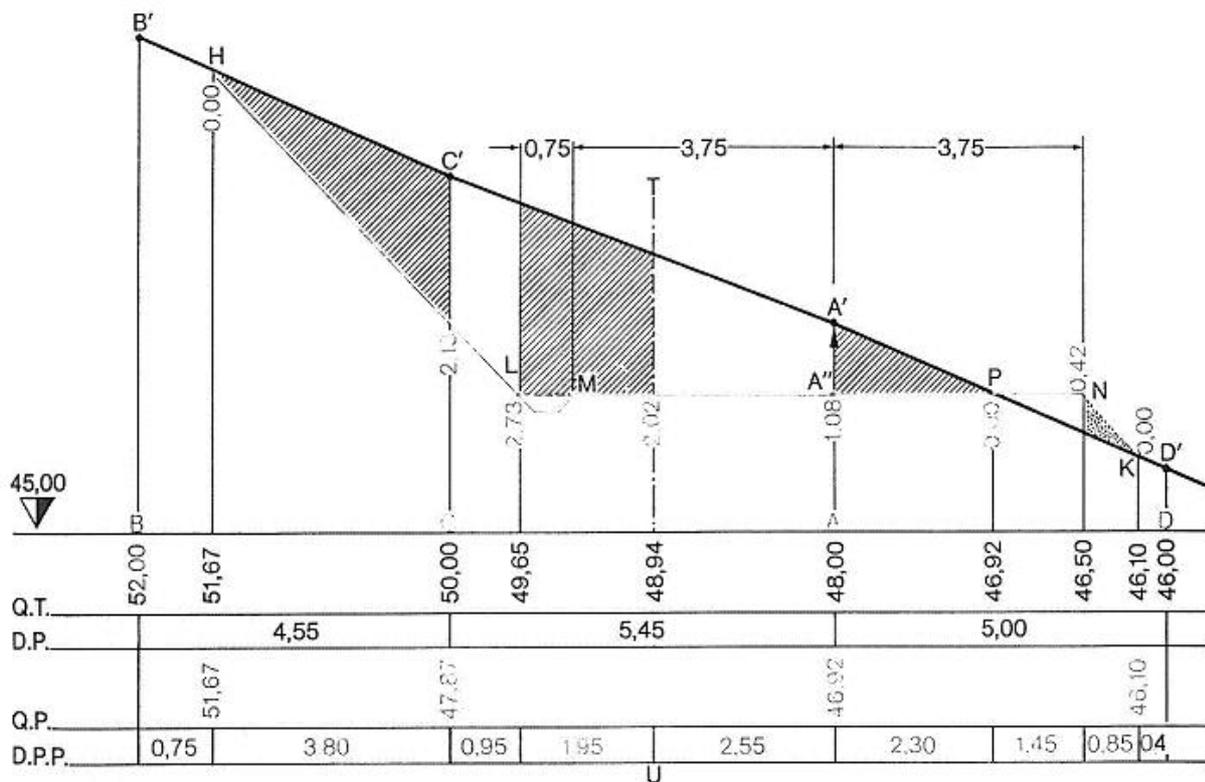
Questa condizione, diversa da quella adottata nel profilo longitudinale (nel quale le scale delle distanze orizzontali e delle quote erano diverse), è d'altronde non solo possibile, ma anche consigliabile. Non è infatti necessario esaltare le pendenze trasversali, come invece si dovette fare nel profilo longitudinale, perché in queste direzioni le irregolarità del terreno sono generalmente più accentuate (lungo l'asse stradale sono invece contenute dalla massima pendenza imposta inizialmente nel tracciolino). È inoltre conveniente usare la stessa scala anche per una più semplice determinazione dell'area delle sezioni.

Successivamente si riporta sul picchetto d'asse *A'* la quota rossa *A'A''* relativa a quella sezione, in alto se corrisponde a riporto e in basso se corrisponde a sterro. Quindi si traccia per *A''* il segmento orizzontale *LN* rappresentante la sede stradale con tutti i suoi elementi (compresa la cunetta

LM), e dai due cicli estremi L ed N della stessa si tirano le due rette inclinate che rappresentano le scarpate di sterro e di riporto. I punti di incontro H e K delle scarpate col profilo del terreno delimitano poi la *larghezza totale di occupazione*. Il disegno va quindi completato con tutti gli elementi numerici già utilizzati per la esecuzione dei due profili e con quelli necessari per dedurre in seguito l'area della sezione, per esempio col metodo numerico.

Sulla fondamentale si segna allora (in azzurro) il valore della *quota di riferimento*, la quale potrà variare da sezione a sezione, e in corrispondenza dei picchetti d'asse e di quelli trasversali eventualmente anche le lettere B, C, A, D (in rosso), indicative dei picchetti stessi.

Figura 6.25 Sezione trasversale n° 5 della planimetria di fig. 6.24.



Sterro	m ²
$1/2 \cdot 2,13 \cdot 3,80$	4,05
$1/2 (2,13 + 2,73) \cdot 0,95$	2,31
$1/2 (2,73 + 2,02) \cdot 1,95$	4,63
cunetta	0,12
S_5	11,11
$1/2 (2,02 + 1,08) \cdot 2,55$	3,95
$1/2 \cdot 1,08 \cdot 2,30$	1,24
S_5'	5,19

Riporto	m ²
$1/2 \cdot 0,42 \cdot 1,45$	0,30
$1/2 \cdot 0,42 \cdot 0,85$	0,18
R_5	0,48

scala 1:1000

Figura 6.26 Sezione di riporto o in rilevato.

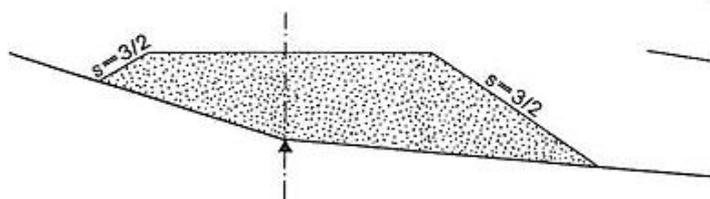


Figura 6.27 Sezione di sterro o in trincea.

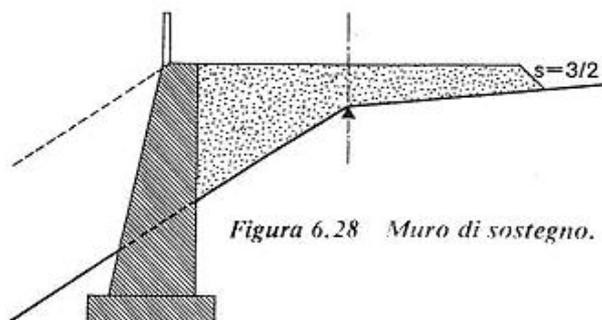
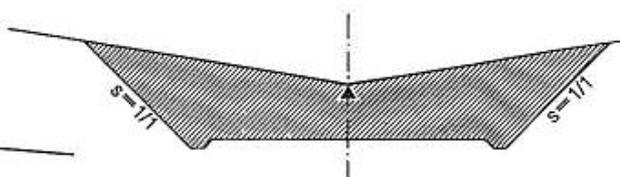


Figura 6.28 Muro di sostegno.

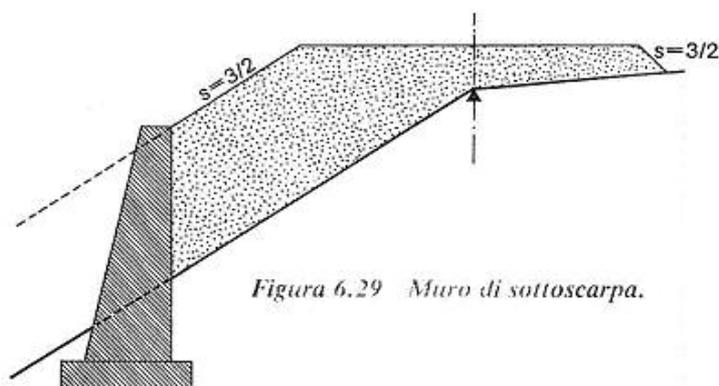


Figura 6.29 Muro di sottoscarpa.

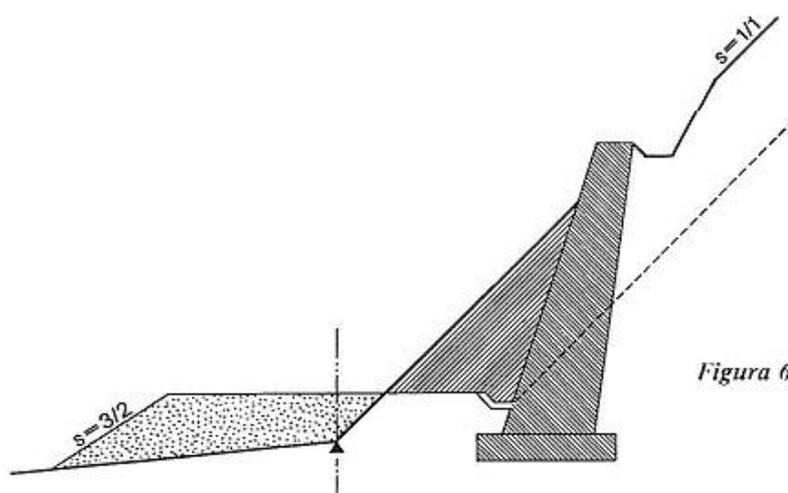


Figura 6.30 Muro di controripa.

Sotto la fondamentale, negli appositi spazi, si riportano le *quote del terreno* (Q.T.), le *distanze parziali* (D.P.), le *quote di progetto* (Q.P.) e le *distanze parziali di progetto* (D.P.P.), relative a tutti quei punti che caratterizzano geometricamente tanto il profilo del terreno che quello di progetto; le prime due indicazioni si segnano *in nero*, le ultime due *in rosso*.

Poiché per il calcolo numerico della sua area la sezione va però divisa in seguito con rette verticali in triangoli e trapezi, che possono ulteriormente essere divisi (*parzializzazione*) in altri triangoli e trapezi dai piani verticali *TU*

passanti per i *punti di passaggio P* delle sezioni precedente e seguente e paralleli all'asse stradale (per potere calcolare, come si vedrà, i volumi di terra), è necessario riportare tutti i valori numerici necessari al calcolo stesso e provvedere contemporaneamente alla parzializzazione della sezione.

In corrispondenza del profilo rosso della sezione, ma sempre esternamente alla sua area, si scrivono inoltre le *quote rosse (in rosso)*, cioè le differenze fra quote di progetto e quote del terreno, le quali rappresentano i valori delle basi delle figure elementari in cui viene scomposta la sezione.

Il disegno si completa con due *tabelle delle aree di sterro e riporto*, nelle quali si riportano i corrispondenti valori parziali e, per somma, quelli totali.

Abbiamo dato sufficienti indicazioni per potere disegnare una *sezione mista o a mezza costa*, evidentemente queste sono però valide anche per il disegno delle *sezioni di riporto o in rilevato* (fig. 6.26) e per quelle *di sterro o in trincea* (fig. 6.27).

La *scarpa* (inverso della pendenza) delle scarpate deve garantire la perfetta stabilità del terreno, tanto nella parte in trincea che nella parte in rilevato. E poiché nel primo caso il terreno è naturalmente assestato da lunghissimo tempo, mentre nel secondo caso è riportato di recente, è necessario attribuire alla scarpa dei riporti un valore più grande (per es. 3 : 2) che non alla scarpa degli sterri (per es. 1 : 1).

Nell'uno e nell'altro caso potrà poi accadere che le scarpate non incontrino il profilo del terreno in un punto abbastanza vicino e sarà necessario costruire dei *muri di sostegno* propriamente detti (fig. 6.28) o di *sottoscarpa* (fig. 6.29) o di *controripa* (fig. 6.30).

Le *cunette* per lo scolo longitudinale delle acque piovane che si riversano sulla sede stradale vengono dimensionate in funzione della portata idrica da smaltire e della pendenza longitudinale. Esse possono assumere un profilo di *trapezio* (fig. 6.31/a/b), o *variabile* o *triangolare* (fig. 6.32/a/b), e sono comprese tra l'arginello e la scarpata nel primo caso, direttamente tra la banchina e la scarpata - senza l'arginello - negli altri due casi (a meno che quest'ultimo non sia ugualmente richiesto per l'installazione di segnali verticali). Una cunetta va però sistemata anche a monte dei muri di controripa, per raccogliere le acque piovane provenienti dalla falda del terreno che sovrasta la strada.

Figura 6.31 Cunette a sezione trapezia

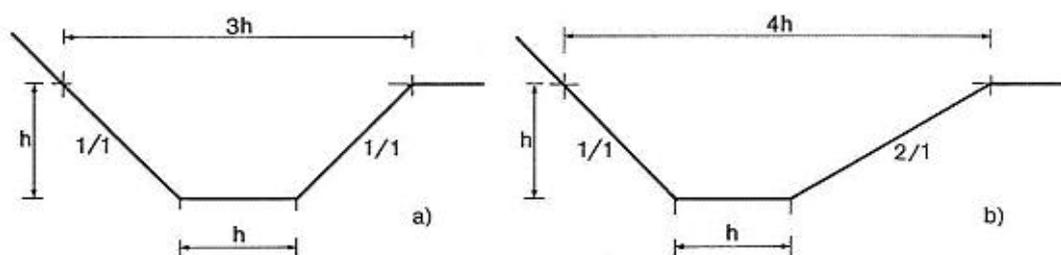


Figura 6.32 Cunette a sezione variabile e triangolare

