

ANNALI

DELLA FACOLTA' DI AGRARIA DELL' UNIVERSITA'

————— SASSARI —————

DIRETTORE: G. RIVOIRA

COMITATO DI REDAZIONE: M. DATTILO - S. DE MONTIS - F. FATICHENTI
C. GESSA - L. IDDA - F. MARRAS - P. MELIS - A. MILELLA - A. PIETRACAPRINA
R. PROTA - A. VODRET

studi sassaresi

ORGANO UFFICIALE
DELLA SOCIETÀ SASSARESE DI SCIENZE MEDICHE E NATURALI



Istituto di Costruzioni Rurali dell'Università di Sassari

(Direttore: Prof. S. De Montis)

STEFANO DE MONTIS* - PAOLO BAZZU**

ASPETTI PLANO-ALTIMETRICI DEL PROGETTO STRADALE E METODI DI TRACCIAMENTO

RIASSUNTO

Gli Autori riferiscono su alcuni aspetti relativi alla fase esecutiva della progettazione delle strade, sviluppandone in particolare gli argomenti che riguardano la compilazione dei più importanti elaborati grafici ed il tracciamento di alcuni elementi che compongono il progetto. Ciò anche ad integrazione di altri studi precedenti nei quali gli stessi Autori hanno sviluppato gli aspetti geometrici delle strade.

SUMMARY

The Authors examine some aspects relative to the executive phase of the planning of the roads, developing in particular the arguments concerning the drawing up of the most important elaborate graphs and the layout of some elements which make up the project. This is integrated with other studies in which the same Authors developed the geometric aspects of the roads.

PREMESSA

Il progetto di un'arteria viaria presenta, e nella fase di stesura preliminare e nei suoi aspetti esecutivi, momenti articolati e complessi a tutti noti che è necessario coordinare e controllare con coerenza e professionalità, nell'intento di conseguire un risultato finale quanto più affidabile e ottimale.

Tali momenti inducono a conoscenze e riflessioni su temi che sono anch'essi articolati e complessi, e che richiamano di volta in volta tra l'altro gli aspetti geometrici e tecnici delle strade, le connessioni dinamiche e meccaniche tra i mezzi che vi transitano e la configurazione delle arterie, l'andamento plano-altimetrico dell'asse viario, gli aspetti topografici, i metodi di tracciamento del manufatto stradale, gli apprestamenti a corredo.

Lo studio si propone di esaminare alcuni di questi temi nell'intento di sviluppare

* Professore Associato e Direttore dell'Istituto di Costruzioni Rurali.

** Collaboratore esterno.

soprattutto gli aspetti di natura topografica e le connessioni con la configurazione plano-altimetrica della strada, ponendo in evidenza in particolare le più importanti operazioni da svolgere nella elaborazione del progetto stradale e coordinandone i vari momenti in cui questo si articola nella sua fase esecutiva.

Argomento di per sé forse non del tutto originale, perché affrontato e trattato da vari autori in innumerevoli testi in maniera ampia ed esauriente, ma che necessita di quando in quando di momenti di sintesi e di aggiornamento in alcuni punti essenziali, così come lo studio si propone appunto di fare. Nello svolgimento del tema vengono in particolare trattati i seguenti aspetti

- a) planimetria, profilo e sezioni trasversali del progetto stradale,
- b) aree e volumi,
- c) diagramma delle masse e dei volumi,
- d) metodi di tracciamento delle curve,
- e) cenni sull'inserimento delle infrastrutture viarie nel progetto,

non prima di aver esaminato alcuni richiami di carattere generale, necessari a puntualizzare gli aspetti relativi alla configurazione trasversale dell'asse viario e a definirne l'assetto plano-altimetrico. Lo studio oltre che elemento di sintesi può considerarsi pertanto come strumento didattico e professionale, utile a quanti riterranno opportuno riflettere e soffermarsi su argomenti troppo spesso poco o nulla considerati nella giusta misura per pedissequa attività di routine o per superficialità.

1. GENERALITÀ

È noto che la spezzata mistilinea tridimensionale nella quale viene schematizzato l'asse di una strada, proiettata su un piano orizzontale di riferimento, rappresenta l'andamento planimetrico dell'arteria e si compone essenzialmente della successione di tre elementi fondamentali quali rettifili, curve a raggio variabile e curve circolari.

Le combinazioni di questi elementi e le loro caratteristiche geometriche sono tali da condizionare lungo il tracciato standards di sicurezza, comfort e affidabilità più o meno ottimali in relazione ed in conformità alla classe della strada che si intende realizzare.

In passato si riteneva che il tracciato ideale dovesse avere configurazione ad asse quanto più possibile rettilineo e la curva veniva considerata un elemento negativo ed inevitabile, perché limitativo della velocità e della funzionalità dell'arteria, da utilizzare con cautela e soltanto nei casi in cui le condizioni dei siti non permettevano soluzioni alternative.

Successivamente si è constatato che le strade realizzate con l'inserimento minimo o nullo di curve presentavano a loro volta carenze e insidie alla sicurezza, dovute principalmente alla eccessiva velocità raggiungibile nella maggior parte dei tratti, previsti appunto con configurazione rettilinea, alla disattenzione nella guida causata proprio dalla lunghezza e frequenza dei rettifili ed agli effetti abbaglianti durante le ore notturne soprattutto nelle strade a carreggiata unica.

È provato che l'alternanza non casuale ma programmata di curve opportunamente previste e raccordate impone all'automobilista velocità di percorrenza compatibili con le caratteristiche geometriche del tracciato ed evita di raggiungere frequentemente velocità troppo elevate nei tratti rettilinei, fonte di pericolo quando mutano le condizioni plano-altimetriche della strada.

Inoltre se l'alternanza e la combinazione di raccordi di vario tipo con tratti di rettilifo, previsti questi come detto in misura corretta, comportano lo svantaggio di allungare il tracciato, va ricordato che tutto ciò presenta anche aspetti positivi, quali facilitare l'inserimento dell'arteria nel paesaggio, ridurre i movimenti di terra, contenere le dimensioni ed il numero delle opere d'arte.

Ciò consente economie nei costi di realizzazione e, a parità di investimenti, miglorie alla piattaforma stradale con conseguenti condizioni di marcia più favorevoli che in qualche misura ripagano dei maggiori costi derivanti dal tracciato più lungo.

2. CARATTERISTICHE E REQUISITI GEOMETRICI

Come ricordato l'asse di una strada si compone di raccordi circolari e raccordi a raggio variabile in presenza o meno di rettifili, i quali, se inseriti nel tracciato, è bene abbiano lunghezze equilibrate e corrette: di solito tali misure, indicate in metri, è opportuno non superino 20-22 volte la velocità di progetto V espressa in Km/h. Inoltre, sempre nel caso in cui nell'andamento planimetrico ricorrano raccordi ad arco di cerchio e tratti a curva variabile, è norma garantire per quanto possibile lungo il percorso la distanza di visuale libera per il sorpasso, realizzando, se necessario, rettifili di lunghezza non inferiore a 5-5,5 volte il valore della velocità V .

E ancora, sempre con tracciato composto, come detto, da rettifili e curve a raggio variabile, è anche necessario siano verificate le seguenti relazioni

$$\text{per } L \leq 500 \text{ m} \quad R_{\min} \geq L \quad 1)$$

$$\text{per } L > 500 \text{ m} \quad R_{\min} \geq 600 \text{ m} \quad 2)$$

$$\text{per } \alpha < 0,125' \quad R > \frac{12}{\alpha'^2} \quad 3)$$

in cui L è la lunghezza del rettilo,

R il raggio della curva circolare,

α l'angolo di deviazione dei rettili corrispondente all'angolo al centro.

Quando due curve circolari si susseguono, ancora raccordate per l'interposizione di un raccordo a raggio variabile, i corrispondenti raggi R_1 e R_2 vanno confrontati con l'abaco della Fig. 1 e il loro punto d'incontro è necessario cada al di fuori delle

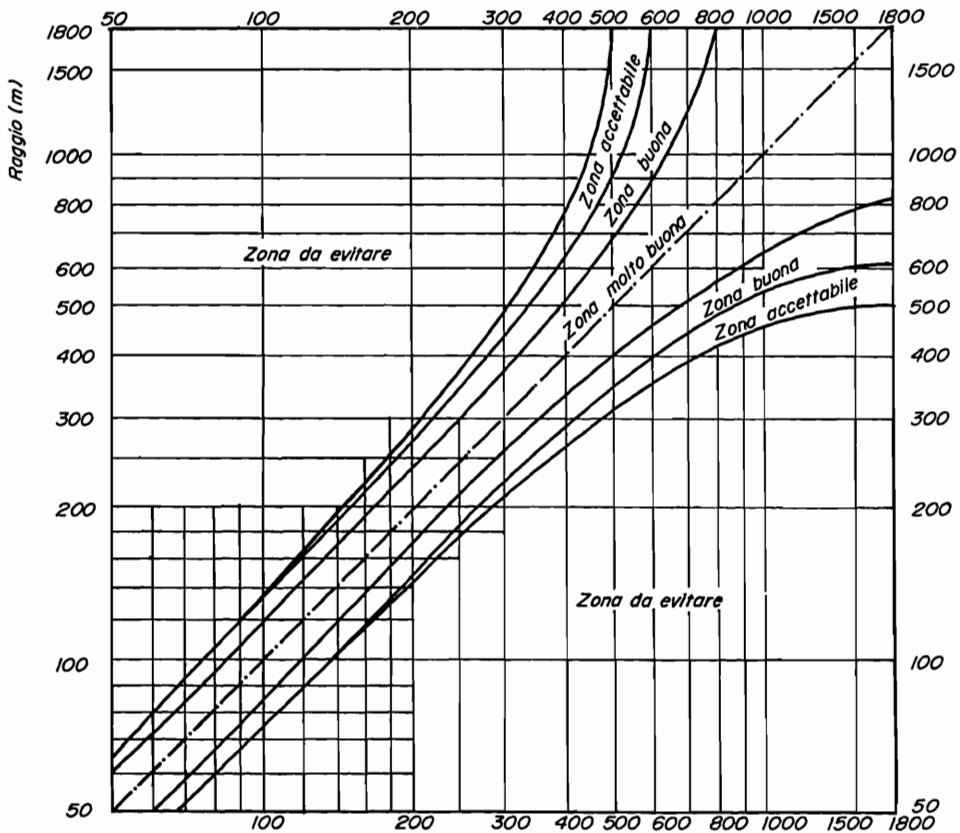


Fig. 1 - Relazione tra i raggi R_1 e R_2 di curve circolari consecutive (fonte CNR).

The relationship between radiuses R_1 and R_2 on circular, consecutive bends (source CNR).

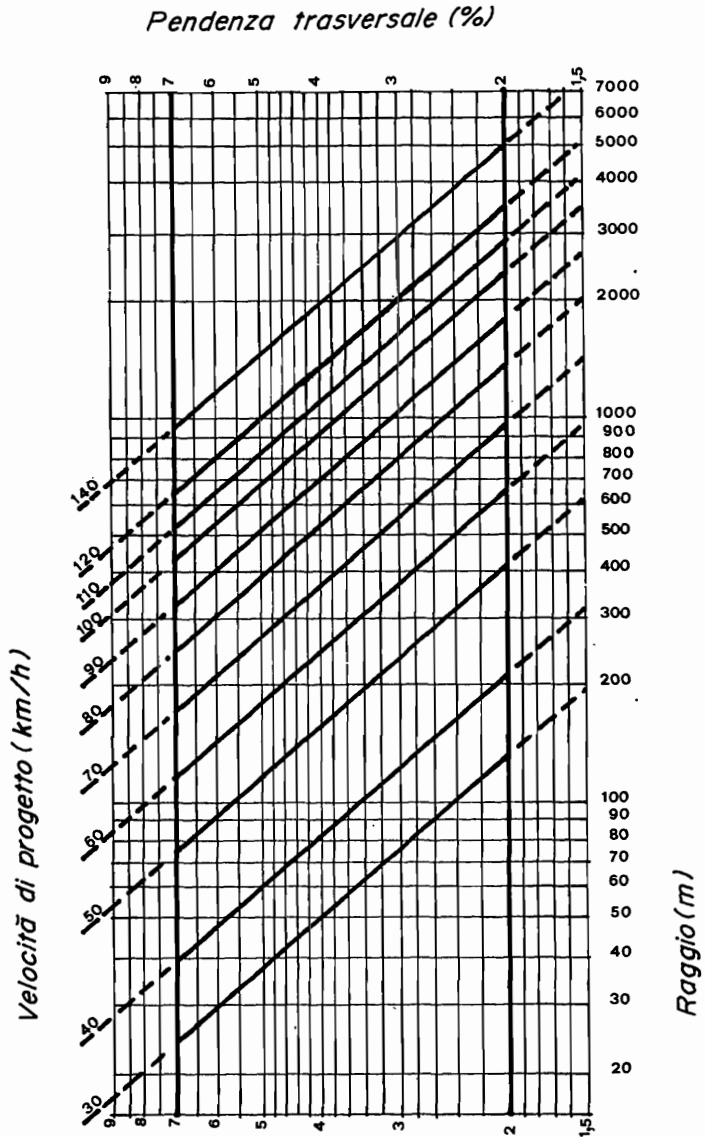


Fig. 2 - Relazione tra velocità di progetto, raggio di curvatura e pendenza trasversale (fonte CNR).
Relationship between the speed of the project, the radius of the curve and the transverse gradient.

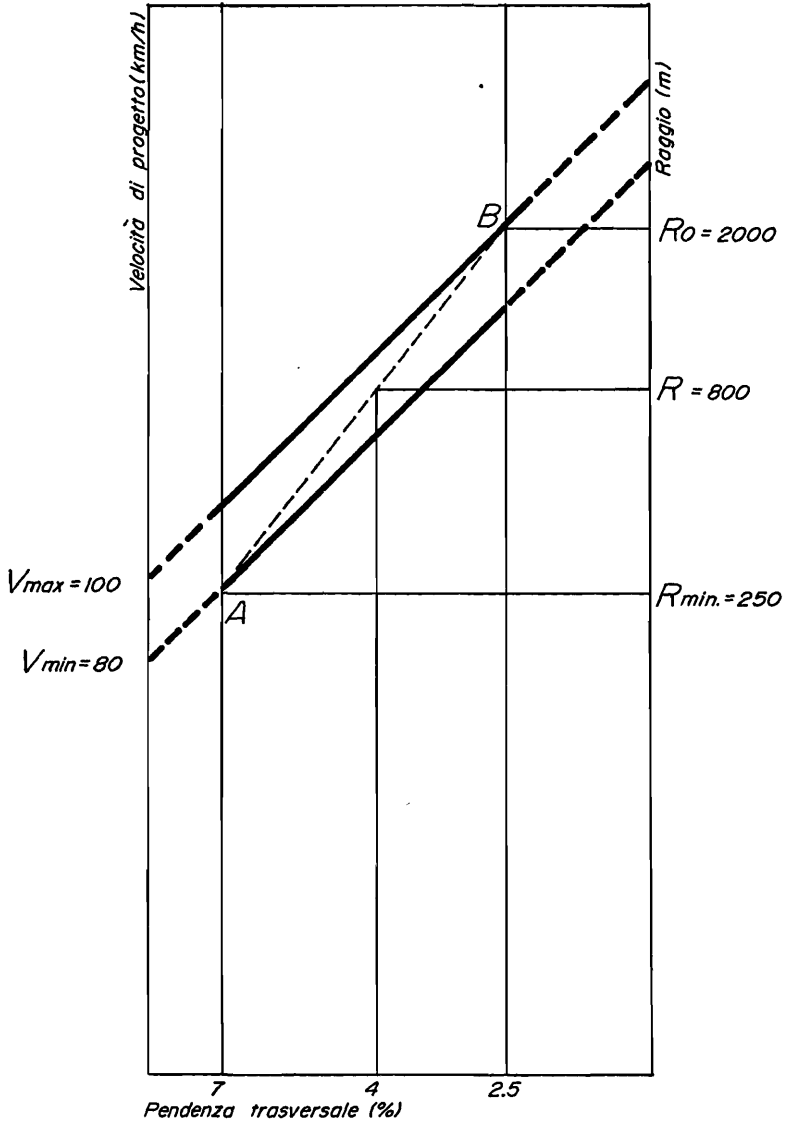


Fig. 3 - Relazione fra raggio di curvatura e intervallo di velocità di progetto.
Relationship between the radiuses of the curve and the velocity interval space of the project.

così dette «zone da evitare», se si vuole conseguire un buon livello di affidabilità e sicurezza della strada.

Va anche ricordato che lungo l'intero sviluppo del tracciato la pendenza trasversale j della piattaforma stradale, quando quest'ultima sia realizzata con pavimentazione bituminosa, deve presentare valori compresi tra 2,5% e 7%, fatta eccezione per i raccordi a raggio variabile.

La relazione fra raggio di curvatura e pendenza trasversale in funzione delle diverse velocità di progetto è rilevabile nell'abaco di Fig. 2.

È comunque necessario verificare che la pendenza totale calcolata con l'espressione

$$J = \sqrt{i^2 + j^2} \quad 4)$$

sia inferiore alla pendenza longitudinale massima consentita per la classe di arteria interessata, maggiorata del 10%, con $j < 1,1 \cdot i_{\max}$ (5)

Qualora la velocità di progetto sia variabile entro un certo intervallo, il raggio di curvatura dei raccordi circolari si determina come indicato nella Fig. 3, estrapolata dalla Fig. 2 precedente, e riferita ad un intervallo di velocità compreso tra 100 e 80 Km/h. Dal grafico si rileva che il raggio minimo R_{\min} corrisponde alla velocità minima ed alla pendenza trasversale massima consentita. Anche il raggio R_0 è ugualmente un raggio di valore minimo, ma corrispondente alla pendenza minima. Congiungendo A con B si ottiene la correlazione fra il raggio R e la pendenza trasversale per l'intervallo di velocità assegnato.

Nei casi considerati, la pendenza trasversale della piattaforma stradale deve essere sempre orientata con il punto più basso verso l'interno della curva. Qualora si voglia realizzare in curva una sagoma trasversale a tetto pari al valore minimo (2,5%) l'ampiezza del raggio di curvatura si determina, in ragione della velocità di progetto, dalla Tab. 1.

Tab. 1

V (Km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	140
R (m)	500	800	1100	1500	2000	3200	4000	5000	7500	10250

Nel caso di due elementi consecutivi a raggio costante, siano essi costituiti da curve circolari oppure formati dalla successione di un rettilineo e una curva circolare, le norme italiane prescrivono l'inserimento intermedio di un tronco di raccordo a raggio variabile. Se questo è formato dalla successione di due clotoidi di parametro A_1 e A_2 , deve essere verificata, com'è noto, la relazione

$$\text{per } A_2 \leq 200 \text{ m} \quad \frac{A_1}{A_2} \leq 1,5 \quad 6)$$

$$\text{per } A_2 > 200 \text{ m} \quad \frac{A_1}{A_2 - 100} \leq 3 \quad 7)$$

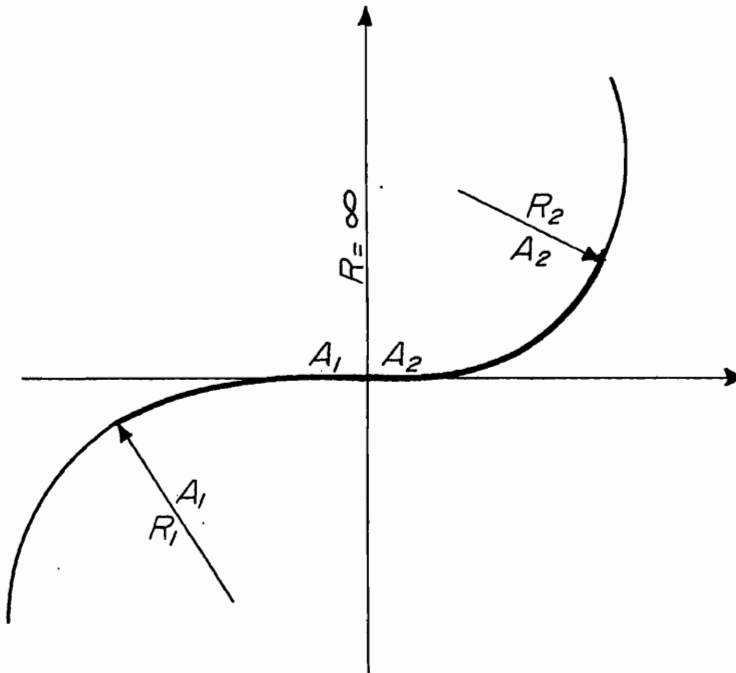


Fig. 4 - Raccordo di due tronchi stradali circolari con due tratti di clotoide aventi parametri A_1 e A_2 .
Connection of two circular road trunks with two stretches of clothoid having the parameters A_1 and A_2 .

Inoltre gli elementi di raccordo ad arco di clotoide tra rettilineo e curva circolare devono avere lunghezza L_1 e L_2 tali che

$$L_1, L_2 \geq 0,4 \alpha' R \quad 8)$$

$$A_1, A_2 \geq R \sqrt{0,4 \alpha'} \quad 9)$$

$$\phi' \geq 0,05 \quad 10)$$

in cui α è l'angolo di deviazione dei rettifili,

R il raggio della curva circolare,

ϕ l'angolo al centro sotteso all'arco di clotoide.

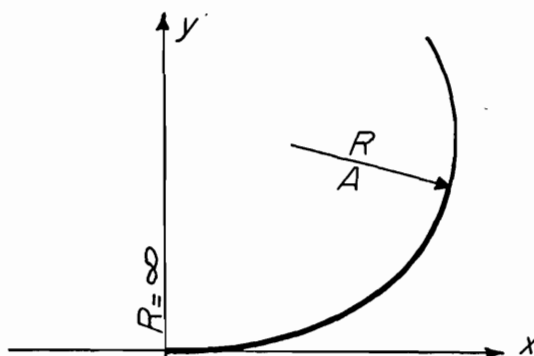


Fig. 5 - Raccordo di rettilo e curva circolare mediante clotoide.
Connection of a straight road and a circular curve by means of a clothoid.

Affinché poi lungo i raccordi clotoidali si abbia una graduale variazione dell'accelerazione trasversale è necessario siano verificate le relazioni

$$A \geq 0,021 V^2 \quad 11)$$

$$C = \frac{50,4}{V} \text{ (costante di contraccolpo)} \quad 12)$$

nelle quali V è espressa in Km/h.

Va anche considerato che lungo il raccordo a raggio variabile inserito tra due elementi a raggio costante si realizza il passaggio dalla configurazione ordinaria della sezione trasversale a quella che si assume nella curva circolare successiva. Tale variazione avviene facendo ruotare la piattaforma intorno al proprio asse oppure intorno ad uno dei cigli.

Nelle strade a carreggiata unica, a una o più corsie, e nelle strade a carreggiate separate con spartitraffico di larghezza superiore a 4 m, si preferisce la rotazione intorno all'asse che consente a parità di valore della deviazione, un minore sollevamento del ciglio della piattaforma stradale.

Nel caso di strade con spartitraffico di larghezza inferiore a 4 m, per evitare che si abbia una pendenza trasversale eccessiva, si preferisce far ruotare ciascuna carreggiata intorno al ciglio interno.

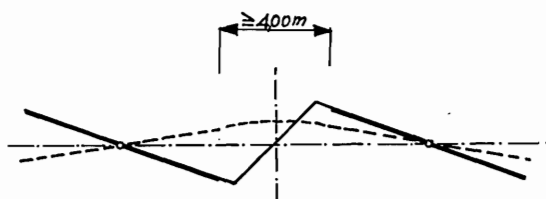


Fig. 6 - Deviazione dei cigli con rotazione intorno all'asse della carreggiata.
Deviation of the edges with rotation around the axis of the carriageway.

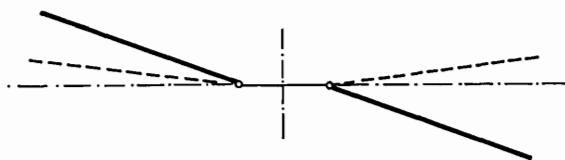


Fig. 7 - Rotazione delle piattaforme intorno ai cigli interni.
Rotation of the platform round the internal edges.

Se la sagoma della carreggiata in rettilineo è a doppia falda il passaggio alla configurazione da assumere nella curva circolare avviene in due tempi: anzitutto si fa ruotare la falda esterna intorno all'asse della carreggiata sino a conseguire la posizione della falda interna e successivamente si fa ruotare ancora intorno all'asse l'intera carreggiata, sino a farle assumere il valore assegnato alla pendenza trasversale nella curva.

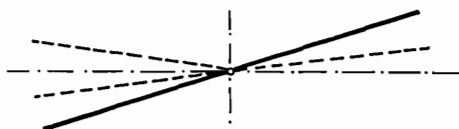


Fig. 8 - Rotazione della piattaforma per configurazioni a doppia falda.
Rotation of the platform for configurations with a double slope.

Nel passaggio da una configurazione all'altra attraverso la rotazione dell'intera carreggiata (ciò avviene ad esempio nella clotoide di flesso) o della sua metà (è il caso da rettilineo con sezione a due falde alla curva circolare), la piattaforma stradale presenta dei punti in cui la pendenza trasversale è inferiore al valore minimo prescritto pari al 2,5%. In tale situazione, perché si abbia un corretto deflusso delle acque e si eviti che si formi sulla carreggiata un velo idrico di spessore pericoloso, è necessario che la pendenza longitudinale Δi del ciglio esterno che si solleva non sia inferiore al Δi_{\min} che si ottiene in valori percentuali dalla seguente espressione

$$\Delta i_{\min} = 0,1 b \quad 13)$$

in cui b è la distanza in metri fra l'asse di rotazione e il ciglio della strada. Qualora la pendenza Δi , espressa dal rapporto tra il dislivello Δh del ciglio da sollevare agli estremi della clotoide e il suo sviluppo L , sia inferiore al valore Δi_{\min} è necessario spezzare in due tratti il profilo del ciglio esterno, realizzando il primo tronco con valori della pendenza trasversale entro il limite minimo del 2,5%, in cui $\Delta i \geq \Delta i_{\min}$ e il secondo tratto con l'inclinazione conseguente che ne deriva.

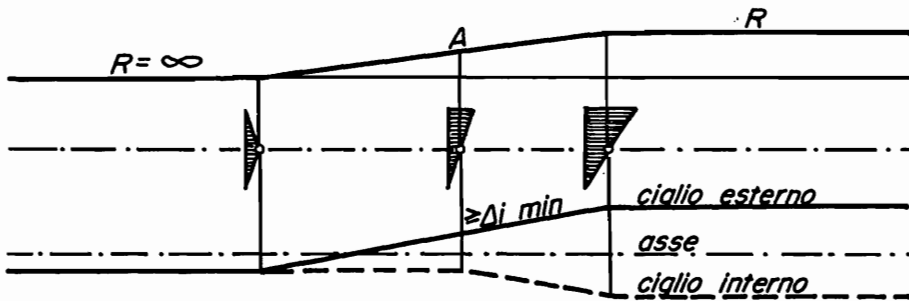


Fig. 9 - Profili dei cigli di carreggiata a doppia falda fra rettilineo e curva circolare ($\Delta i \geq \Delta i_{\min}$).
Profiles of the edges of a carriageway with double slopes between a straight road and a circular bend.

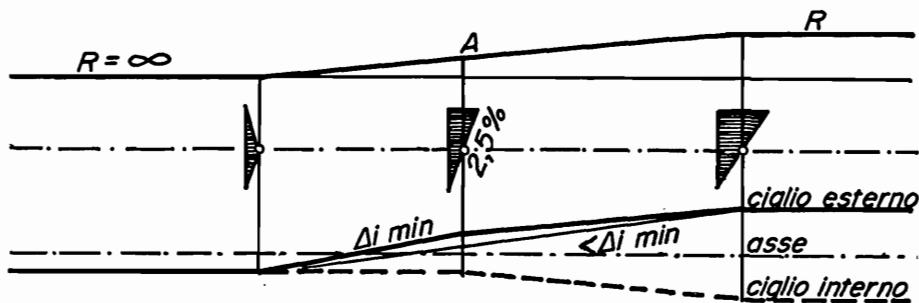


Fig. 10 - Profili dei cigli di carreggiata a doppia falda fra rettilineo e curva circolare ($\Delta i < \Delta i_{\min}$).
Profiles of the edge of a carriageway with double slopes between a straight road and a circular bend.

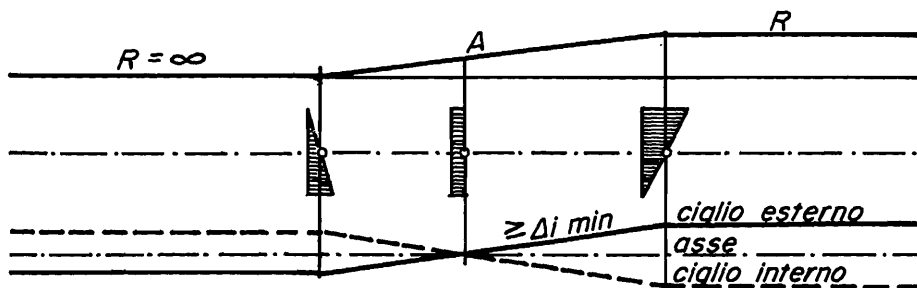


Fig. 11 - Profili dei cigli di carreggiata a unica falda fra rettifilo e curva circolare.
 La sezione del rettifilo è di segno contrario ($\Delta i \geq \Delta i_{min}$).
 Profiles of the edges of a carriageway with one slope between a straight road and a circular bend.
 The section of straight road has opposite directions.

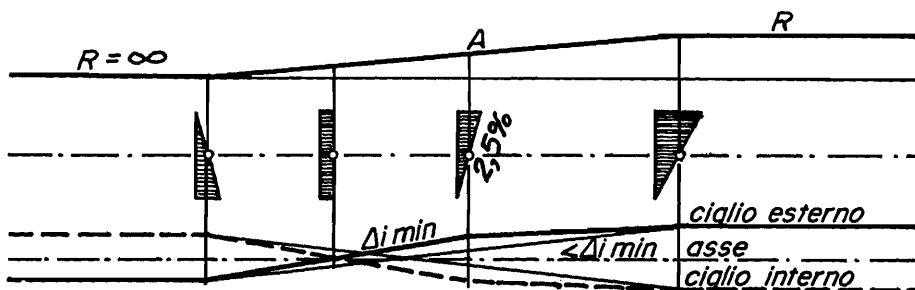


Fig. 12 - Profili dei cigli di carreggiata a unica falda fra rettifilo e curva circolare.
 La sezione nel rettifilo è di segno contrario ($\Delta i < \Delta i_{min}$).
 Profiles of the edges of a carriageway with one slope between a straight road and a circular bend.
 The section of straight road has opposite directions.

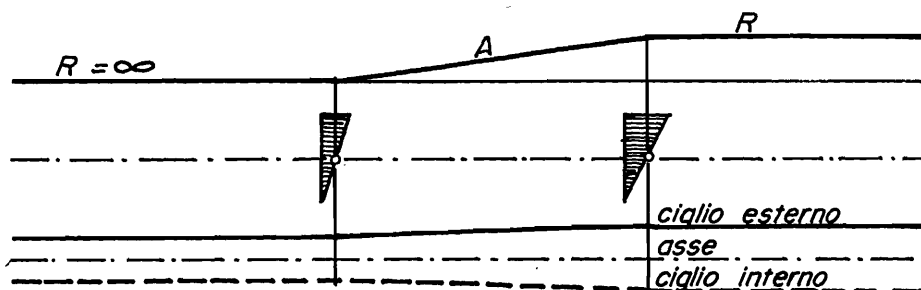


Fig. 13 - Profili dei cigli di carreggiata a unica falda fra rettifilo e curva circolare.
 La sezione nel rettifilo è concorde.
 Profiles of the edges of a carriageway with one slope between the straight road and a circular bend.
 The section of the road has the same directions.

I richiami sui raccordi trattati nel presente paragrafo non si applicano alla progettazione dei tornanti di montagna per i quali i raggi di curvatura hanno valori inferiori, ma in ogni caso ampiezza tale da consentire, mediante opportuni allargamenti, l'iscrizione in corsia dei veicoli transitanti sulla curva.

Nella viabilità rurale, le norme sulle caratteristiche geometriche richiamate in precedenza vanno seguite coerentemente per le strade principali, mentre per la rete di penetrazione interna queste possono essere non osservate.

Tali tracciati sono infatti sempre condizionati dai limiti di proprietà e dalle colture esistenti, nonché dalla presenza di altre infrastrutture che limitano se non impediscono spesso configurazioni geometriche ottimali. È importante comunque ricordare che il livello funzionale di queste strade secondarie non si ottiene in ragione della velocità consentita, di norma molto bassa, bensì dalla loro larghezza o eventualmente dal corretto posizionamento delle piazzuole di scambio per le strade a corsia unica, che permettono la regolare circolazione dei mezzi agricoli impiegati nelle operazioni colturali di campo e d'azienda.

3. ASPETTI TOPOGRAFICI

Vengono ora tratteggiati, in maniera riassuntiva e schematica, alcuni aspetti relativi ai singoli elementi che compongono il progetto stradale, quali in particolare l'andamento planimetrico, il profilo longitudinale, le sezioni trasversali; i grafici di riferimento elaborati a supporto sono invece eseguiti in dettaglio e contengono pertanto i particolari necessari a rappresentare ogni caratteristica peculiare.

3.1. La planimetria

Definito l'andamento della sede viaria in progetto, con elaborazione piano altimetrica su carte topografiche e/o direttamente con rilievi sul terreno in particolare se si tratta di progetto esecutivo, si ricavano i dati tecnici necessari a rappresentarne l'asse. Nei punti in cui si manifestano variazioni significative dell'andamento del terreno si fissano i picchetti, in corrispondenza dei quali si considerano numerate in successione le corrispondenti sezioni trasversali. Scelta la scala grafica più opportuna (a seconda delle necessità e del caso compresa nell'intervallo 1:5000 - 1:1000), si rappresentano gli elementi più interessanti della strada: corsie, cigli, scarpate, raggi di curvatura, angoli al centro, tangenti, opere d'arte e quanto altro si rende necessario per l'esatta definizione di ogni parte dell'opera in progetto.

Di recente si va sempre più diffondendo tra i progettisti l'uso a rappresentare in una seconda planimetria a corredo solamente i dati tecnici riferiti all'asse della strada:

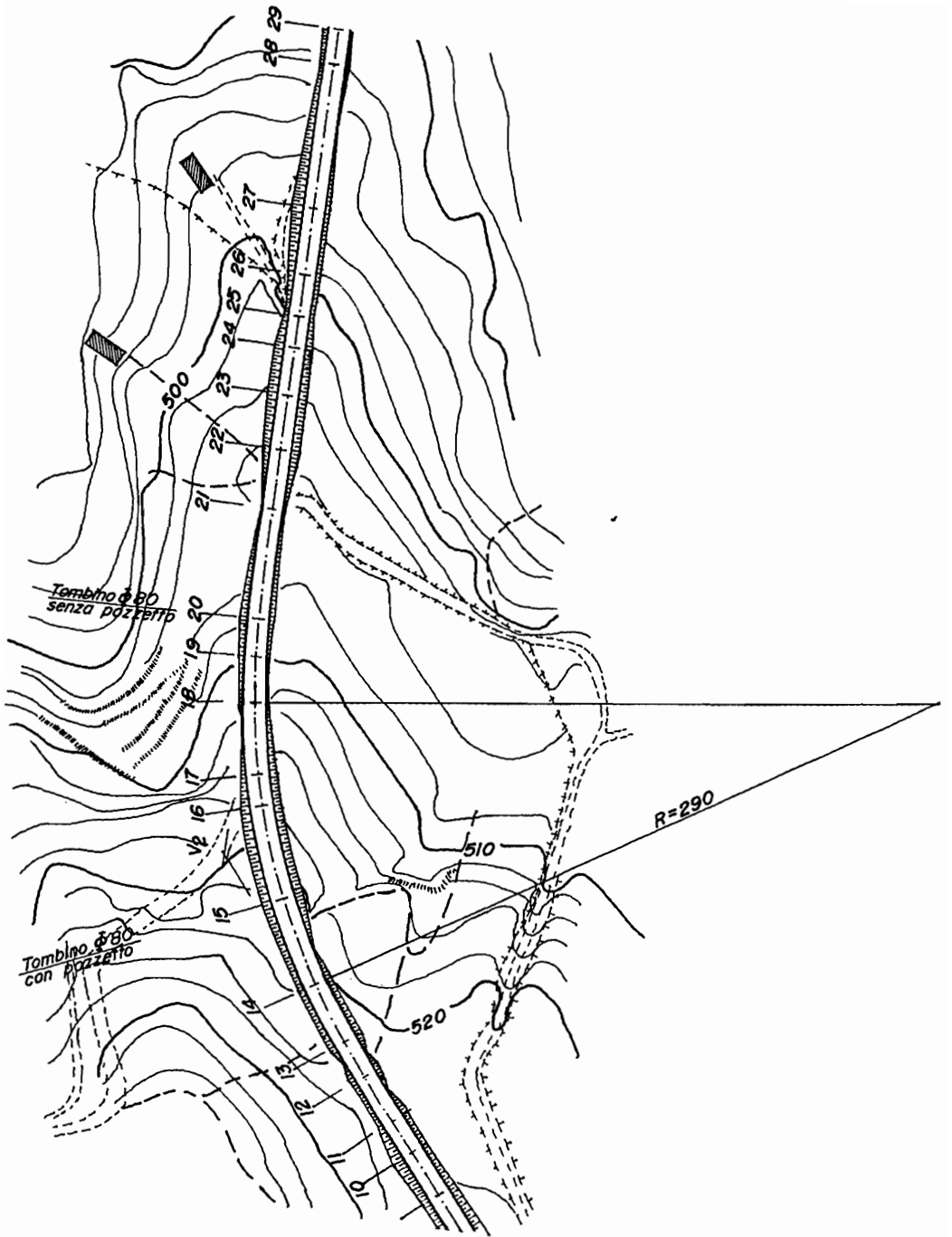


Fig. 14 - Planimetria di un tratto di strada.
 Plan of a section of road

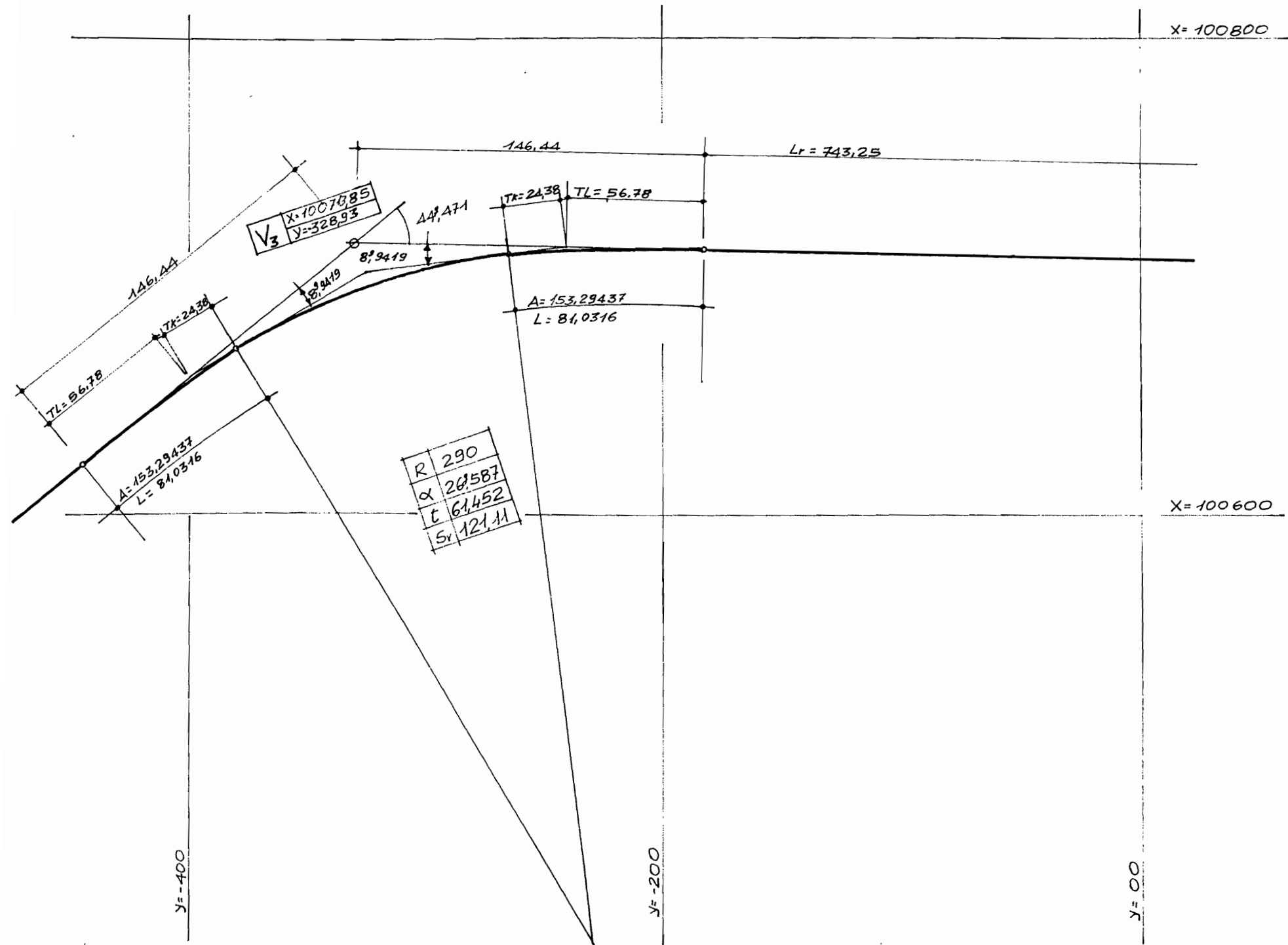


Fig. 15 - Planimetria in dettaglio per il tracciato di un tratto di strada.
Plan for the lay-out of a section of road.

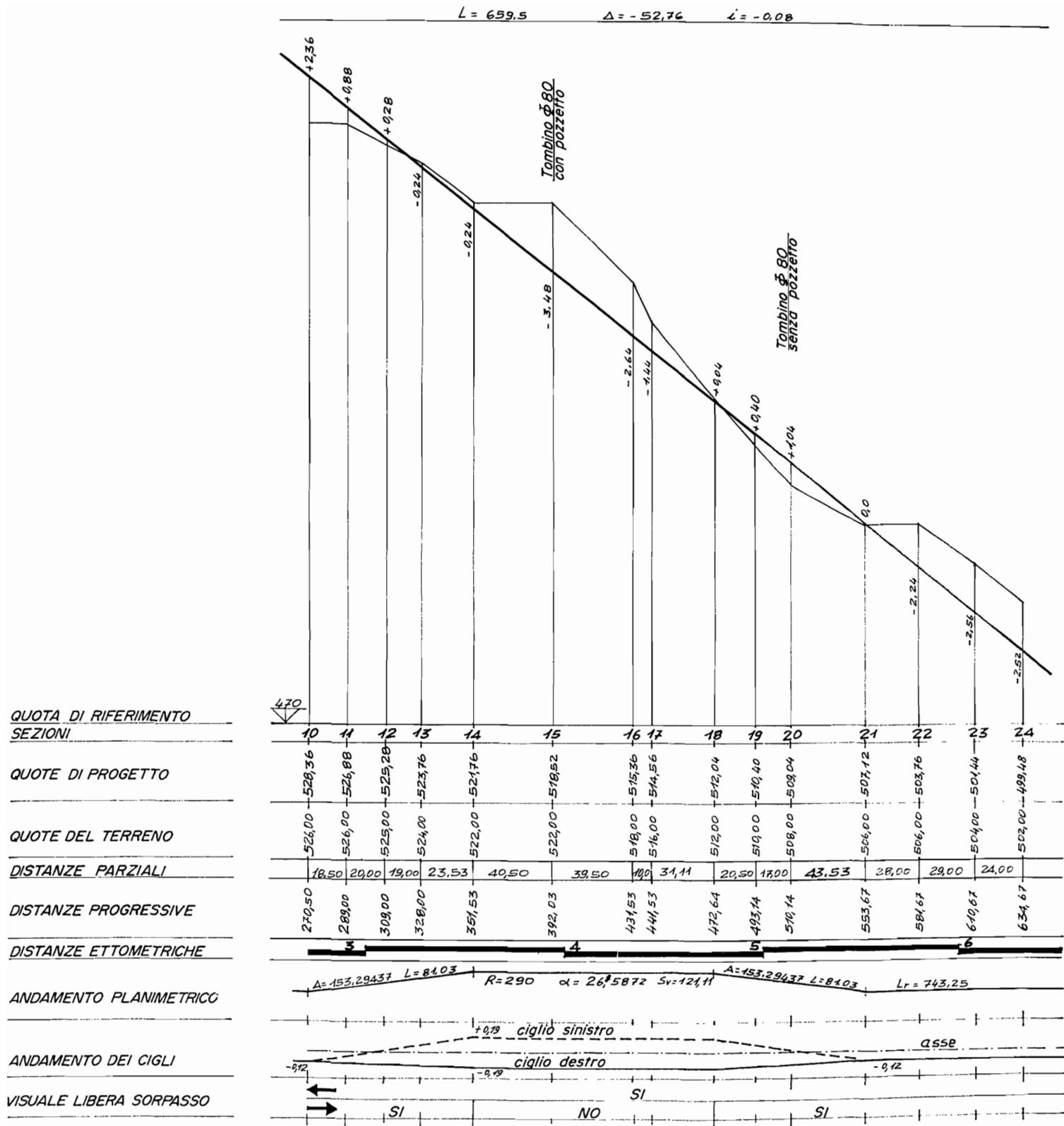


Fig. 16 - Profilo longitudinale di un tratto di strada.
Longitudinal profile of a stretch of road.

l'elaborato, che riporta in genere i parametri della cartografia, è molto utile nella fase di tracciamento dell'arteria di cui facilita non poco le operazioni.

I due elaborati così definiti e compilati sono sufficienti a caratterizzare il tracciato nel suo assetto planimetrico.

3.2. Profilo longitudinale

Per definire più compiutamente il tracciato è necessario disegnare il corrispondente profilo longitudinale: se nella planimetria si sono indicati i dati planimetrici, in questo si riportano i dati relativi all'altimetria. L'elaborazione viene riferita ad un piano cartesiano le cui ascisse rappresentano le distanze rapportate alla stessa scala usata per la planimetria, mentre nelle ordinate si indicano le altezze per le quali per esigenze di visualizzazione, si prende a riferimento una scala decupla rispetto alla precedente. Tracciato l'andamento del terreno naturale riferito ai punti significativi numerati e definiti nella planimetria, si passa allo studio delle livellette di progetto secondo noti criteri e tenendo a riferimento i seguenti valori-limite per le pendenze longitudinali previsti dalle norme italiane:

strade di tipo I e II	$i_{\max} = 5\%$
strade di tipo III e IV	» = 6%
strade di tipo V e A	» = 7%
strade di tipo VI	» = 10%
strade di tipo B e C	» = 12%

Le ordinate, che rappresentano le quote del terreno (quote nere) e della strada (quote rosse), in genere non possono geometricamente essere indicate nel profilo per intero perché riferite al livello medio del mare, ma vengono riportate assumendo a riferimento una opportuna quota, variabile tratto per tratto a seconda delle esigenze.

Elementi importanti da annotare sul profilo sono certamente il numero progressivo delle sezioni, le relative quote del terreno e di progetto, le distanze parziali progressive ed ettometriche, l'andamento planimetrico con rettili e curve, l'andamento dei cigli, la lunghezza e l'inclinazione delle livellette, le ordinate di sterro o riporto e le opere d'arte.

3.3. Sezioni trasversali e volumi dei solidi stradali

L'argomento riguarda gli aspetti relativi ai piani trasversali passanti per i picchetti disposti in successione lungo il tracciato e si propone di determinare aree e volumi degli elementi che concorrono a definire sotto il profilo costruttivo ed economico il progetto della strada. Importante è infatti determinare le aree d'occupazione, i movimenti di terra, i compensi, le opere d'arte necessarie lungo lo sviluppo del tracciato.

3.3.1. Le sezioni trasversali

Le sezioni trasversali sono comunemente intese come intersezione del manufatto stradale con piani normali alla proiezione orizzontale dell'asse longitudinale della strada. Vengono configurate come immagini di un osservatore che guardando verso l'origine procede all'indietro nel senso progressivo della numerazione dei picchetti: le scale normalmente impiegate sono 1:100 o 1:200. Per riportare su elaborati grafici le sezioni si fa riferimento ad una orizzontale che interseca le ordinate in corrispondenza dei picchetti localizzati lungo il profilo: il numero del picchetto contraddistingue anche la sezione corrispondente.

Elementi fondamentali da riportare sono le quote del terreno e le quote di progetto, le ordinate di sterro o di riporto, le distanze parziali e totali riferite all'asse stradale. Poiché le sezioni vengono rappresentate in maniera schematica e riferite alla piattaforma stradale (carreggiata + banchine + cunette o cigli) è importante indicare gli schemi tipo al fine di descrivere compiutamente e per quanto più possibile il manufatto in progetto. Allo scopo in dette sezioni tipo si riportano gli elementi geometrici più caratteristici sufficienti a definirle. Non sono necessarie ulteriori considerazioni data la conoscenza ormai consolidata dell'argomento: ogni aspetto è infatti definito e rappresentato sui grafici elaborati allo scopo.

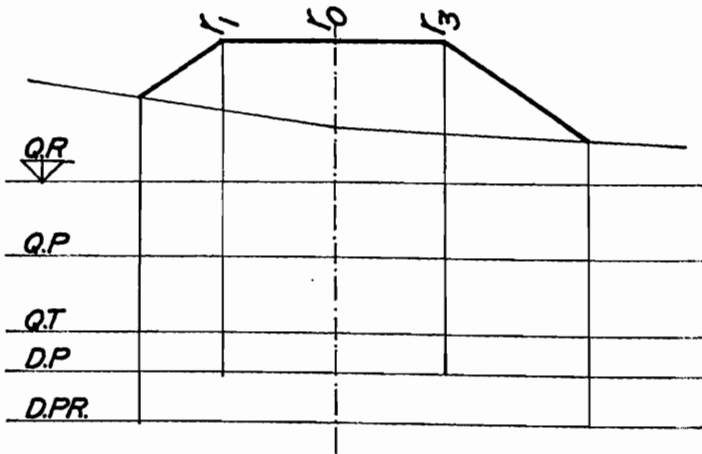


Fig. 17 - Sezione in rilevato.
Section of embankment.

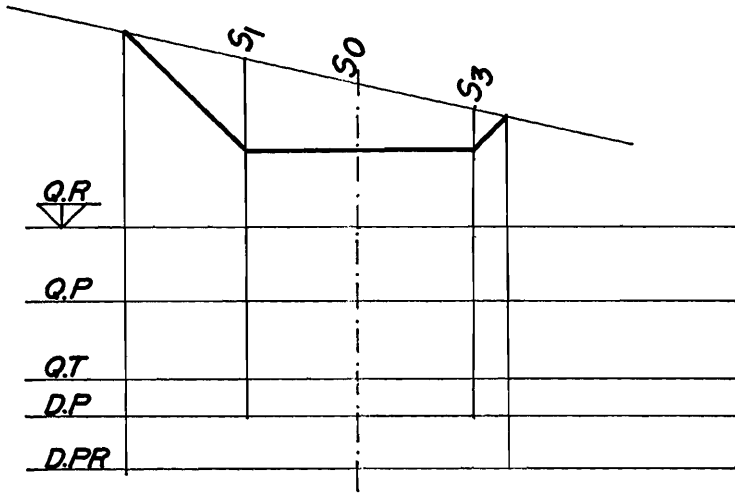


Fig. 18 - Sezione in trincea.
Section of cutting.

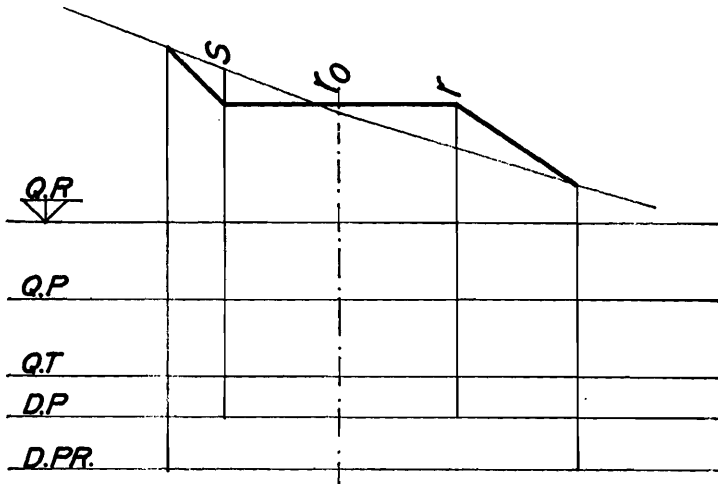


Fig. 19 - Sezione mista.
Mixed section.

3.3.2. Misura della zona di occupazione

Per determinare i costi di esproprio è necessario procedere all'inventario delle aree occupate dalla strada predisponendo il piano particellare che, sotto il profilo quantitativo e qualitativo distinto per singola ditta, riporta i dati riferiti ai terreni interessati dall'arteria.

La zona di occupazione, non si limita com'è noto soltanto allo spazio necessario alla realizzazione del manufatto stradale inteso in senso limitato, ma a questo devono sommarsi due fasce neutre di «franco» o di rispetto laterali, definite dal limite superiore o inferiore della scarpata, a seconda che si tratti di trincea o di rilevato, e dal lato esterno della recinzione.

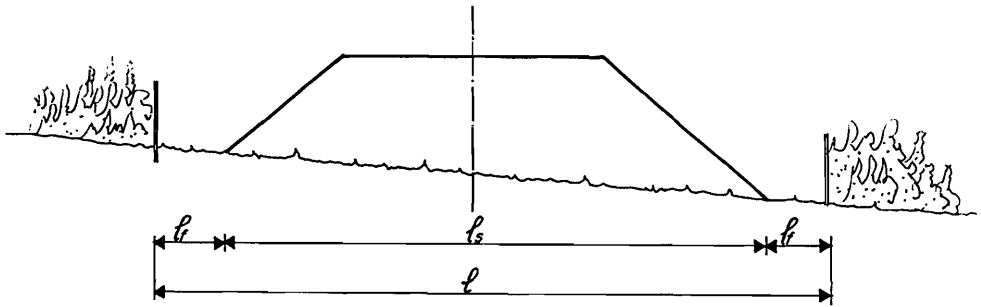


Fig. 20 - Larghezza della fascia di occupazione di sezione in rilevato.
The width of the section of the embankment.

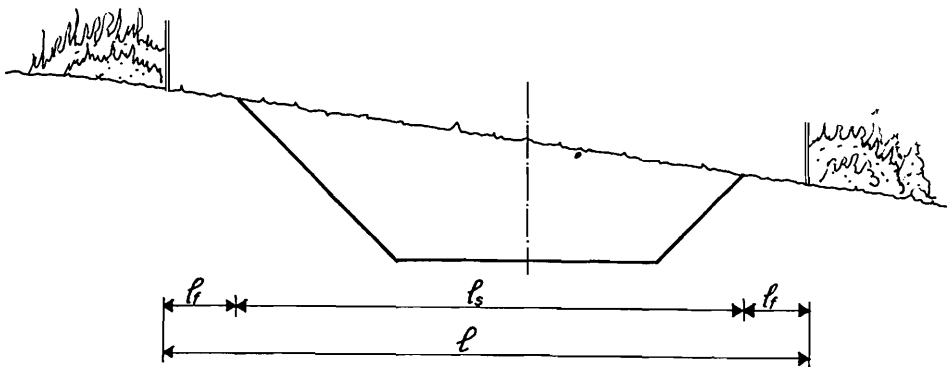


Fig. 21 - Larghezza della fascia di occupazione di sezione in trincea.
The width of the section of cutting.

L'area occupata fra due sezioni consecutive si determina pertanto con l'espressione

$$S = \left(\frac{l_{s,n} + l_{s,n+1}}{2} + 2 l_f \right) d_{n,n+1} \quad (14)$$

in cui $l_{s,n}$ è la larghezza della strada, comprese le scarpate, nella sezione n^{ma} considerata,

l_f la fascia neutra di rispetto,

d la distanza fra due sezioni consecutive.

La larghezza della strada l_s si può desumere graficamente dalla sezione, quando questa sia stata disegnata con cura: essa si ottiene per somma delle distanze parziali progressive rispetto all'asse riportate nel grafico di ciascuna sezione. Per maggiore precisione, si utilizza il procedimento analitico con il quale le larghezze vengono ricavate in funzione della pendenza delle scarpate e del terreno naturale. Considerata la limitata applicazione pratica del metodo di calcolo analitico, che dipende soprattutto dal grado di applicazione necessario, se ne tralascia la trattazione. Sommando le distanze progressive parziali, determinate come dianzi ricordato, si ottiene sostanzialmente il medesimo risultato con maggiore semplicità e speditezza.

3.3.3. Calcolo delle aree delle sezioni trasversali

Il calcolo delle aree delle sezioni trasversali rappresenta una fase preparatoria per il calcolo dei volumi e consiste nel determinare, suddividendola in scavi e riporti, la superficie di ciascuna sezione, delimitata dal piano naturale di campagna, dal piano di imposta della sovrastruttura viaria e dalle scarpate laterali.

A seconda del grado di precisione richiesta, le superfici possono essere calcolate con metodi analitici, grafico-numeriche o meccanici.

Il metodo analitico, in passato quasi mai utilizzato per la eccessiva laboriosità, si ripropone oggi rivalutato nel calcolo computerizzato. Esso consiste in relazioni matematiche che, in funzione della pendenza trasversale del terreno e di quelle delle scarpate, della larghezza della sede stradale e della quota di progetto, consentono di determinare la superficie della sezione.

Il metodo grafico-numerico riassume in se semplicità e precisione più che sufficienti e, poiché garantisce continue verifiche sull'elaborazione, trova larga diffusione nella contabilizzazione nei movimenti di terra.

Il procedimento consiste nella suddivisione delle sezioni in figure elementari (triangoli, rettangoli, trapezi), a seconda delle configurazioni e degli elementi che si conoscono (distanze parziali e ordinate).

I metodi meccanici vanno perdendo interesse, considerato soprattutto l'impiego

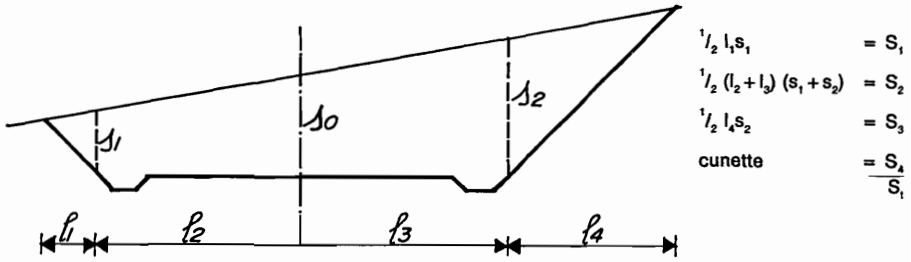


Fig. 22 - Sezione in trincea.
Section of cutting.

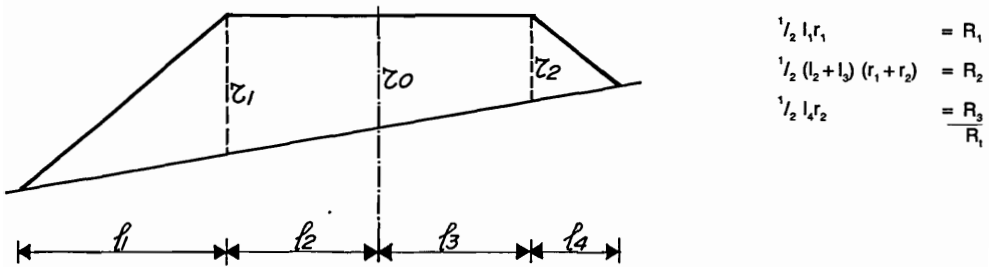


Fig. 23 - Sezione in rilevato.
Section of the embankment.

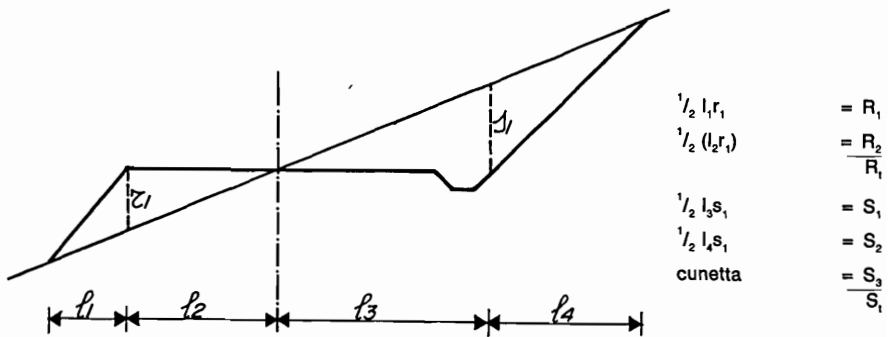


Fig. 24 - Sezione a mezza costa.
Section between embankment and cutting.

sempre piú generalizzato dei computers che consentono ormai processi di elaborazione e di restituzione in tempo reale.

Il metodo meccanico è il piú spedito, si esegue con i planimetri e trova applicazione nella contabilità di massima.

Tab. 2 - Esempio di prospetto per il calcolo delle superfici in sterro e in riporto

Numero sezioni	STERRO		RIPORTO	
	Calcolo superficie parziale mq	Totale mq	Calcolo superficie parziale mq	Totale mq

3.3.4. Calcolo dei volumi dei solidi di terra

Per determinare il costo del manufatto stradale è necessario tra l'altro conoscere i movimenti di terra che è necessario eseguire, distinti in sterri e riporti, rappresentati dalla somma dei volumi dei solidi definibili tra due sezioni consecutive ed aventi come involucro laterale il piano di campagna, la piattaforma stradale e le scarpate. Una tale figura è assimilata ad un prismoide il cui volume si calcola con la formula

$$V = (F_1 + F_2 + 4F_m) \frac{d}{6} \quad (15)$$

in cui F_1 e F_2 rappresentano le aree delle sezioni esterne, F_m l'area della sezione intermedia equidistante dalle precedenti, d la distanza tra le due sezioni esterne.

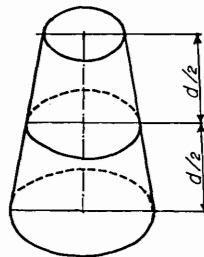


Fig. 25 - Prismoide.
Prismoid.

La sezione media F_m introdotta nella (15), variando le aree con funzione parabolica e non lineare, non corrisponde alla media aritmetica $\frac{F_1 + F_2}{2}$:

tuttavia, poiché l'errore che si commette è tollerabile, nell'uso pratico si assume

$$F_m = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

che sostituita nella precedente porta all'espressione

$$V = (F_1 + F_2 + 4 \frac{F_1 + F_2}{2}) \frac{d}{6} = (F_1 + F_2) \frac{d}{2} \quad (15')$$

Questa formula approssimata di facile applicazione è chiamata com'è noto delle sezioni raggugliate.

Considerato che il solido compreso tra due sezioni consecutive può essere omogeneo, non omogeneo, misto, si hanno i seguenti casi applicativi della (15').

a) Solido omogeneo

Le sezioni sono entrambe di sterro o di riporto.

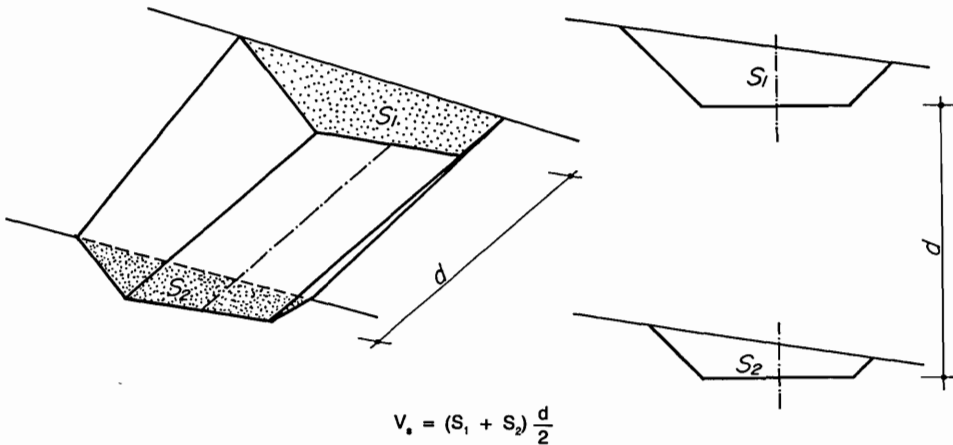


Fig. 26 - Solido omogeneo in trincea o in sterro.
Homogenous body in cutting.

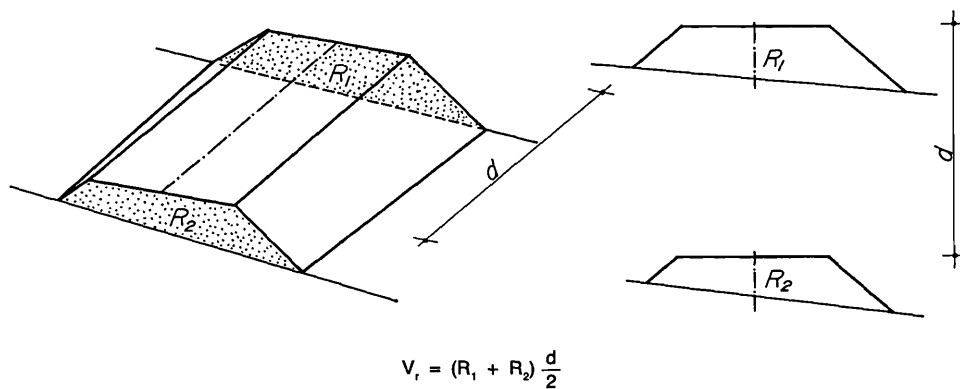


Fig. 27 - Solido omogeneo in riporto.
Homogenous body in embankment.

b) Solido non omogeneo

Si ha quando due sezioni consecutive sono una di sterro e l'altra di riporto.

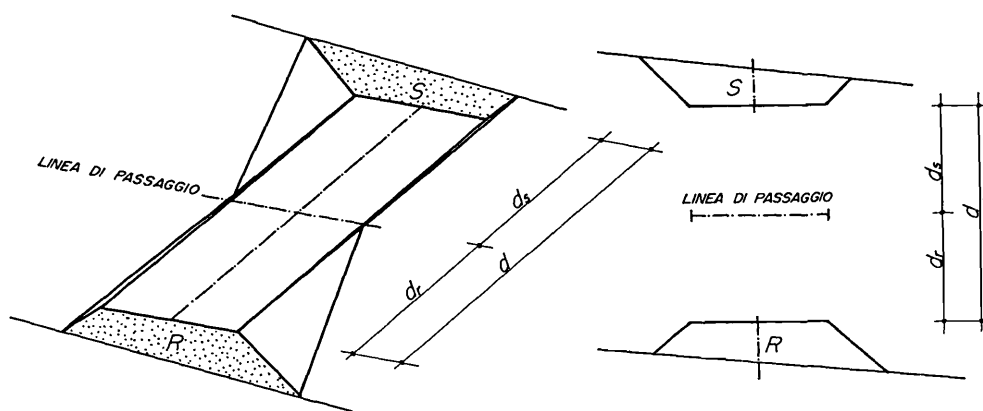


Fig. 28 - Solido non omogeneo.
Non homogenous body.

In questo caso il solido è composto da due cunei separati da una «linea di passaggio», considerata retta anche se di fatto non lo è, lungo la quale sono nulli sia lo scavo che il riporto. Per determinare le distanze d_s e d_r , supposto il terreno regolare nel tratto da scavare e nel tratto da riportare, si ammette che le variazioni del-

l'area della sezione vari linearmente in proporzione alla distanza e che quindi sussiste la relazione

$$d_r : d_s = R : S$$

da cui, componendo e tenendo presente che $d_r + d_s = d$, si ottengono le note relazioni

$$d_r = \frac{d R}{R + S} \quad d_s = \frac{d S}{R + S} \quad 16)$$

Determinati d_r e d_s è possibile calcolare il volume del solido non omogeneo così come definito

$$V_r = \frac{R}{2} d_r \quad V_s = \frac{S}{2} d_s \quad 17)$$

c) Solido misto

Una o entrambe le sezioni sono di tipo misto, parte in rilevato parte in sterro. I due casi sono indicati nelle figure 29 e 30.

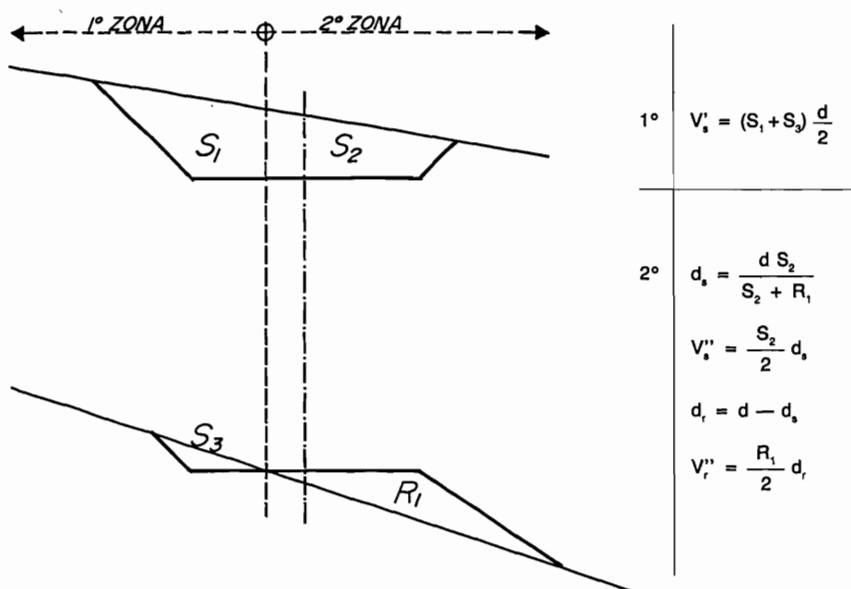


Fig. 29 - Solido con una sezione mista e una omogenea.
Body with one mixed section and one homogenous section.

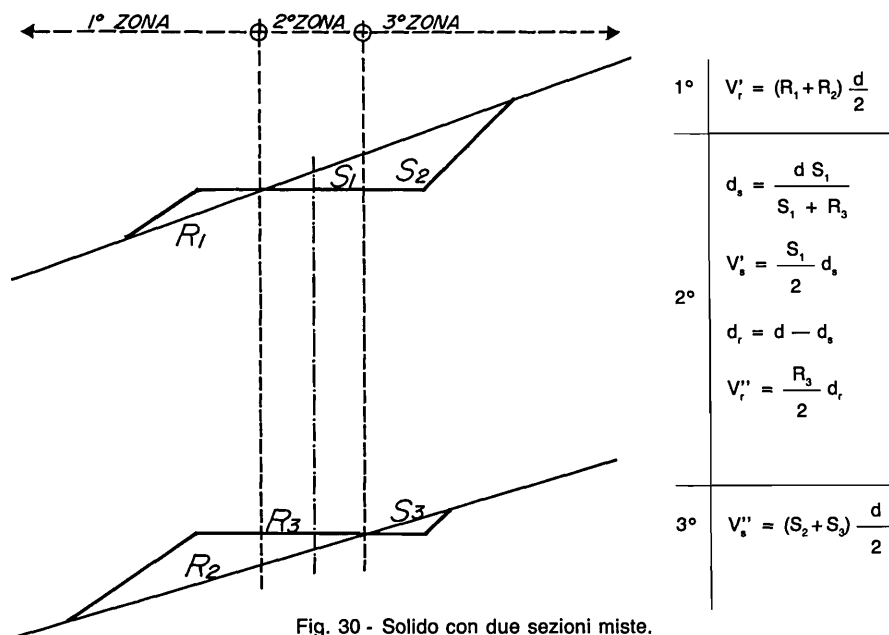


Fig. 30 - Solido con due sezioni miste.
Body with two mixed sections.

Quanto detto si riferisce a tronchi di arteria rettilinei, mentre se la strada è in curva e la sezione si mantiene costante il volume si determina con l'espressione

$$V = Fd \left(1 + \frac{a}{R} \right) \quad (18)$$

in cui F è la sezione costante della strada lungo la curva,

d lo sviluppo della curva lungo l'asse,

a la distanza del baricentro dall'asse (fig. 31). Tale distanza si determina con i noti metodi della statica e si considera positiva o negativa a seconda che il baricentro cada all'esterno o all'interno dell'asse stradale,

R il raggio della curva.

Se invece la sezione della strada non si mantiene costante lungo la curva, si sostituisce ad F la media ponderale delle sezioni e ad a la media ponderale delle distanze.

3.3.5. Diagramma delle masse

Per diagramma delle masse, o delle aree, s'intende la curva ottenuta riportando in ascisse le distanze tra i punti progressivi rilevate dal profilo longitudinale e in ordinate le aree delle rispettive sezioni relative ai corrispondenti picchetti.

Ricordando che le aree delle sezioni possono essere in sterro e riporto si hanno ordinate positive e negative: le prime di norma si riportano al di sopra dell'asse delle ascisse (ordinate positive), le aree di riporto al di sotto (ordinate negative).

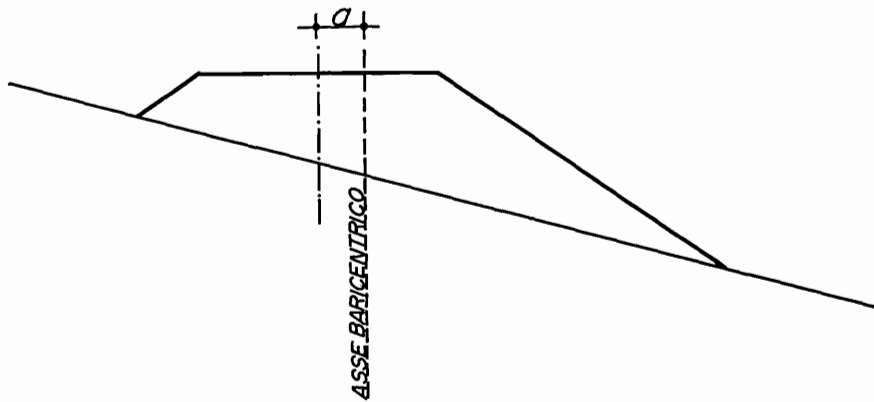


Fig. 31 - Posizione del baricentro rispetto all'asse in una sezione in rilevato.
Position of the baricentre in respect to the axis in a section of embankment.

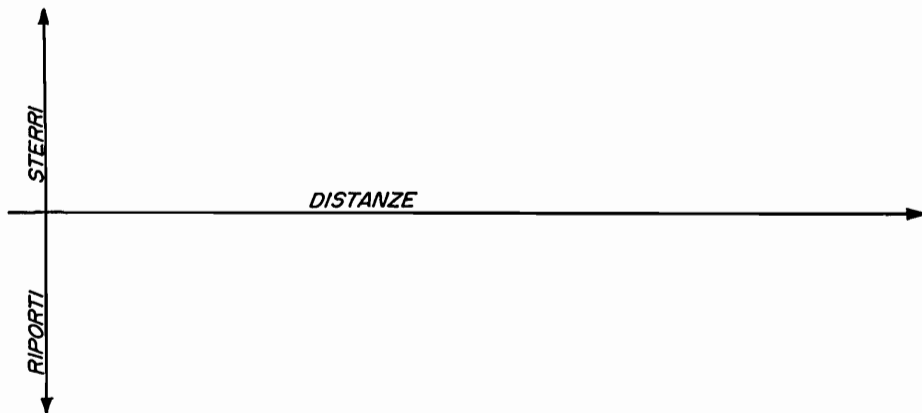


Fig. 32 - Assi di riferimento per il diagramma della masse.
Reference axis for the diagram of the mass.

Scelte le opportune scale di riferimento per le distanze e per le aree, si costruisce il diagramma riportando le aree delle sezioni così come riferito, e ricordando che possono essere omogenee, non omogenee o miste.

a) Sezioni omogenee

Si tratta di sezioni in scavo o in riporto e pertanto il diagramma si ottiene collegando i punti delle ordinate.

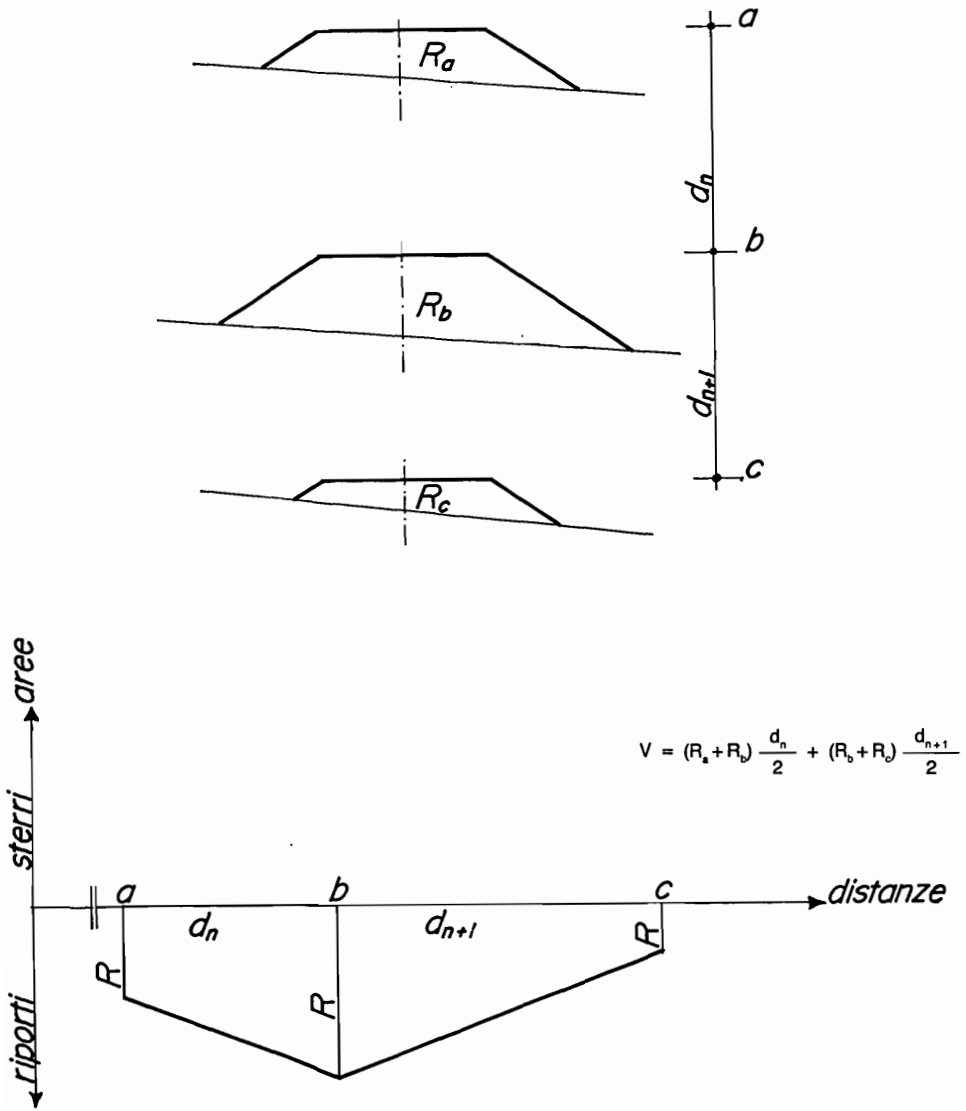


Fig. 33 - Diagramma delle masse in un tronco stradale compreso tra sezioni omogenee in rilevato.
 Diagram of masses in a road trunk made up of homogenous sections in a embankment.

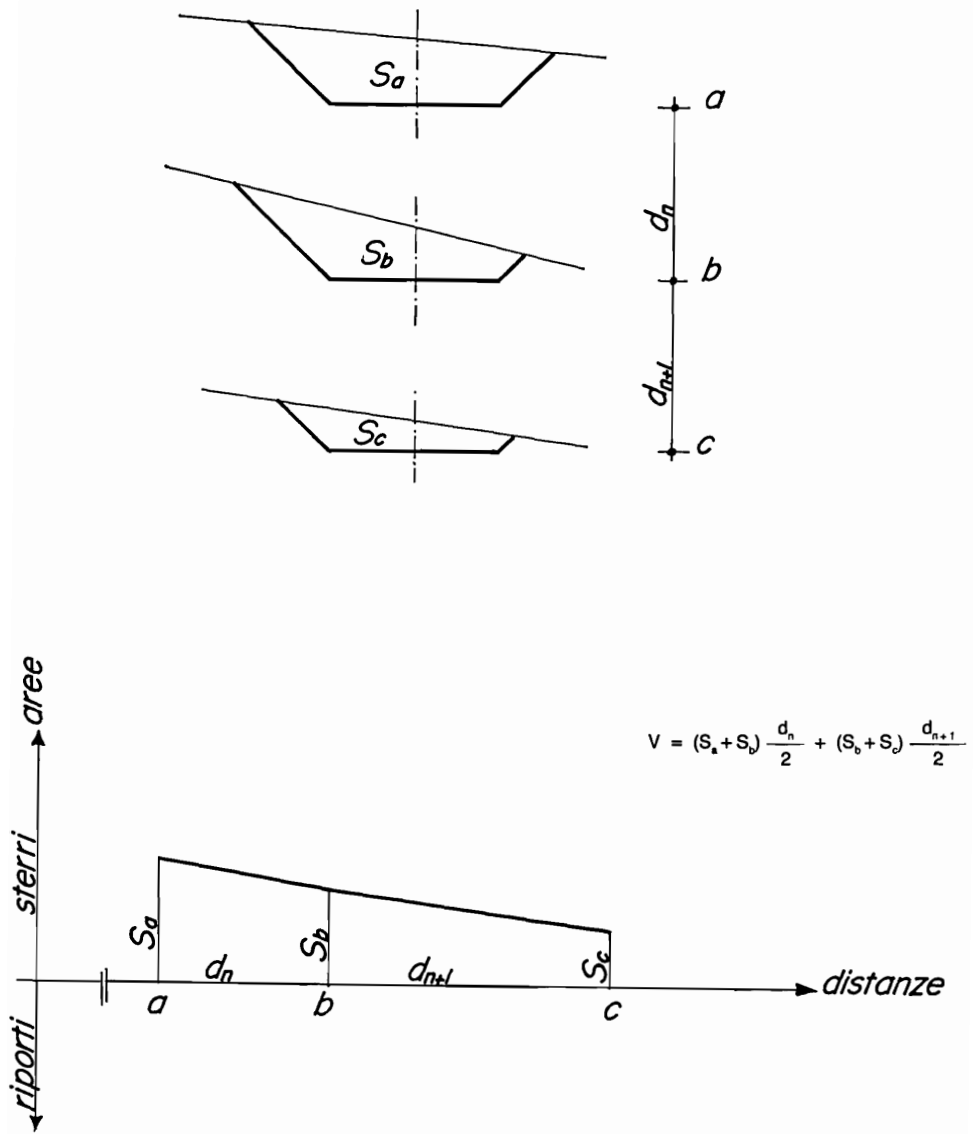


Fig. 34 - Diagramma delle masse in un tronco stradale compreso tra sezioni omogenee in sterro.
Diagram of masses in a road trunk made up of homogenous section in an cutting.

b) Sezioni non omogenee

Le sezioni sono una di sterro e l'altra di riporto ed il relativo diagramma si ottiene congiungendo ancora gli estremi delle ordinate.

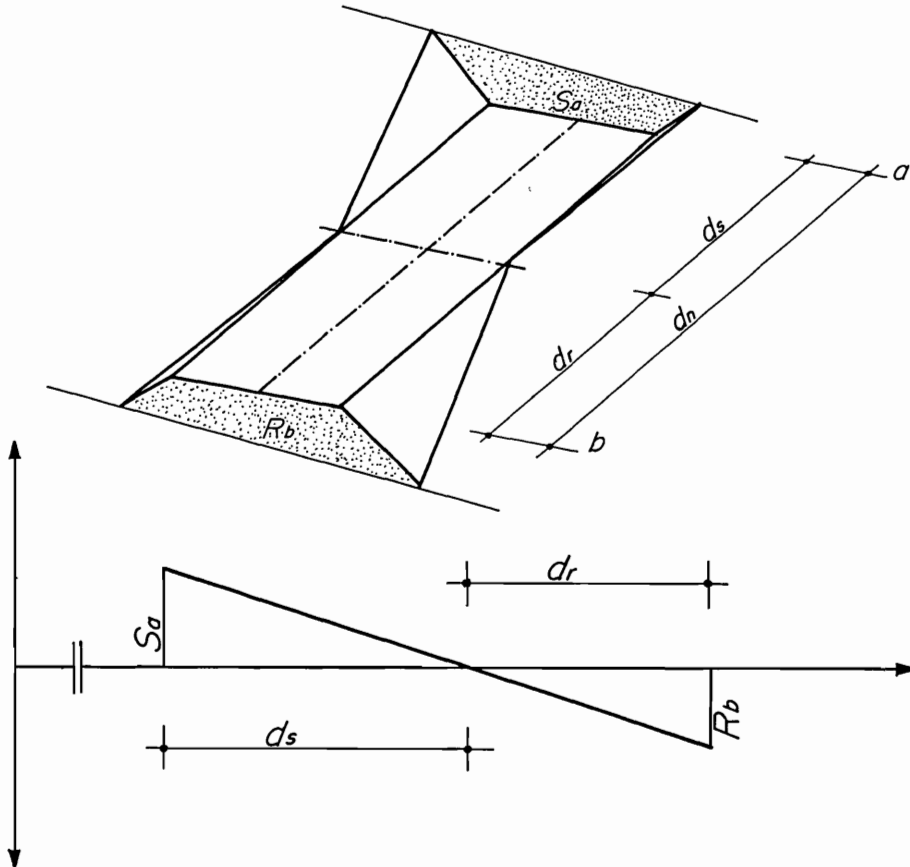


Fig. 35 - Diagramma delle masse in un tronco stradale compreso tra due sezioni non omogenee.
Diagram of masses in a road trunk made up of two non homogenous sections.

c) Sezioni miste

Nel caso in cui almeno una delle due sezioni estreme del tronco sia mista, si procede alla suddivisione in zone omogenee parziali, come già indicato per il calcolo delle aree delle sezioni: tale soluzione riconduce il problema ai casi a o b precedenti, con l'avvertenza che per lo stesso tronco si presentano due o più combinazioni.

A titolo esemplificativo vengono riportati graficamente due casi tipici e ricorrenti di sezioni miste.

1) La prima sezione è in sterro, la seconda mista

Per tracciare il diagramma delle masse del tronco stradale delimitato dalle due sezioni a e b considerate, si riportano in ascisse i punti corrispondenti e si traccia il diagramma della seconda zona (si comincia sempre dalla sezione non omogenea), così come descritto al punto b e come indicato in figura 36, tenendo presente che la congiungente l'estremo di S_2 con P viene tracciata con linea a tratti; si passa successi-

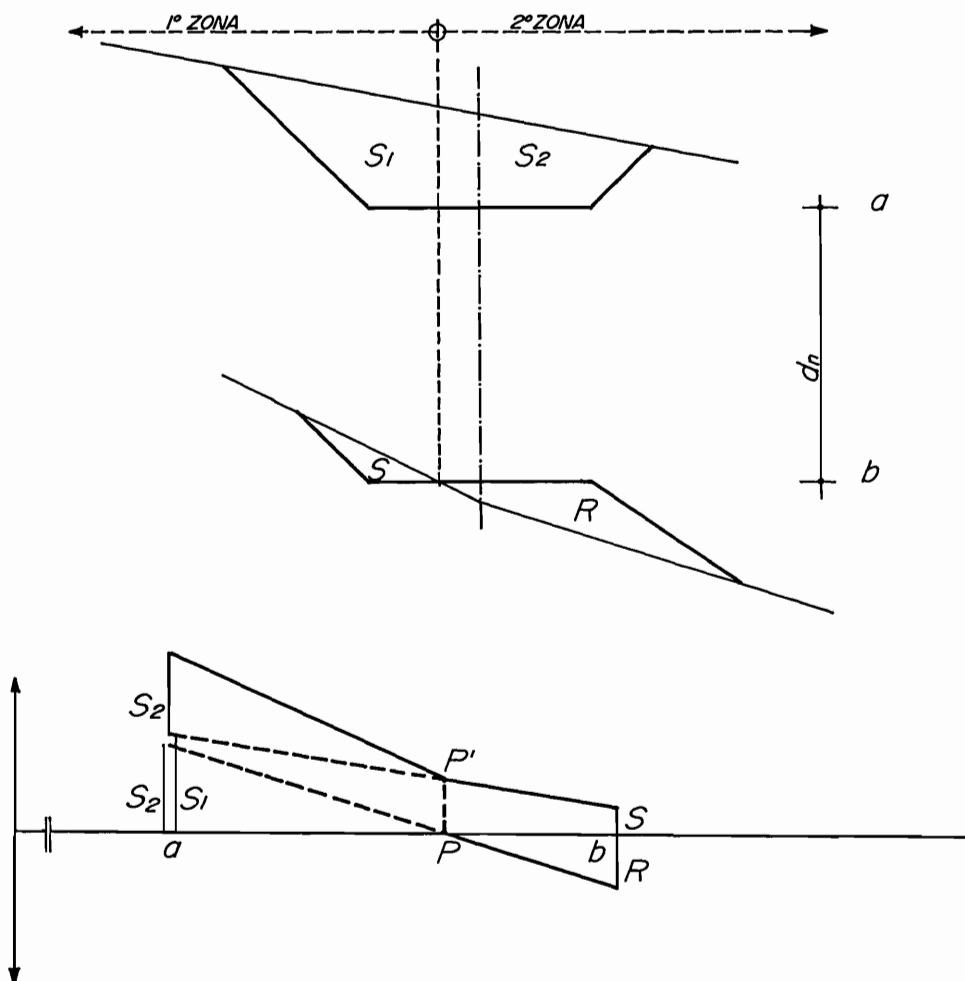


Fig. 36 - Diagramma delle masse in un tronco stradale compreso tra una sezione omogenea e una mista.
Diagram of masses in a road trunk made up of one homogenous section and one mixed section.

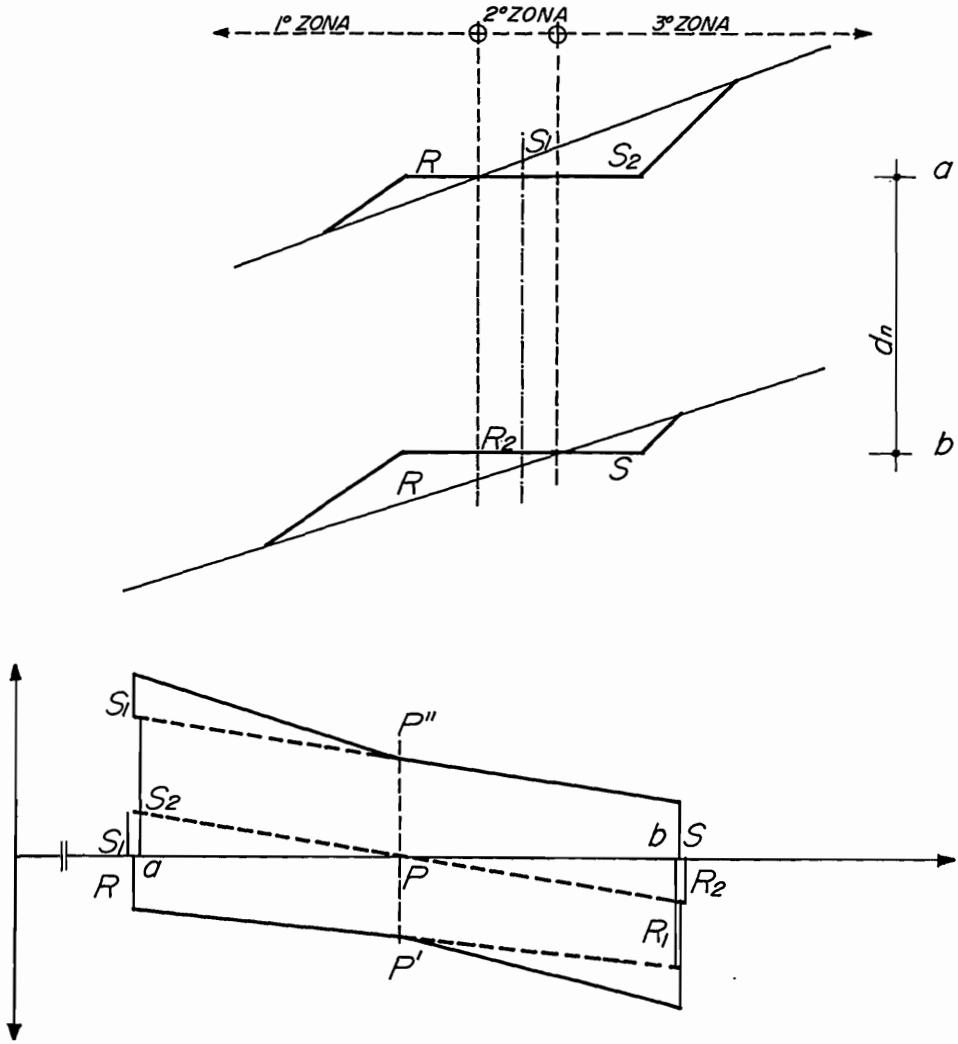


Fig. 37 - Diagramma delle masse in un tronco stradale compreso tra due sezioni miste.
Diagram of masses in a road trunk made up of two mixed sections.

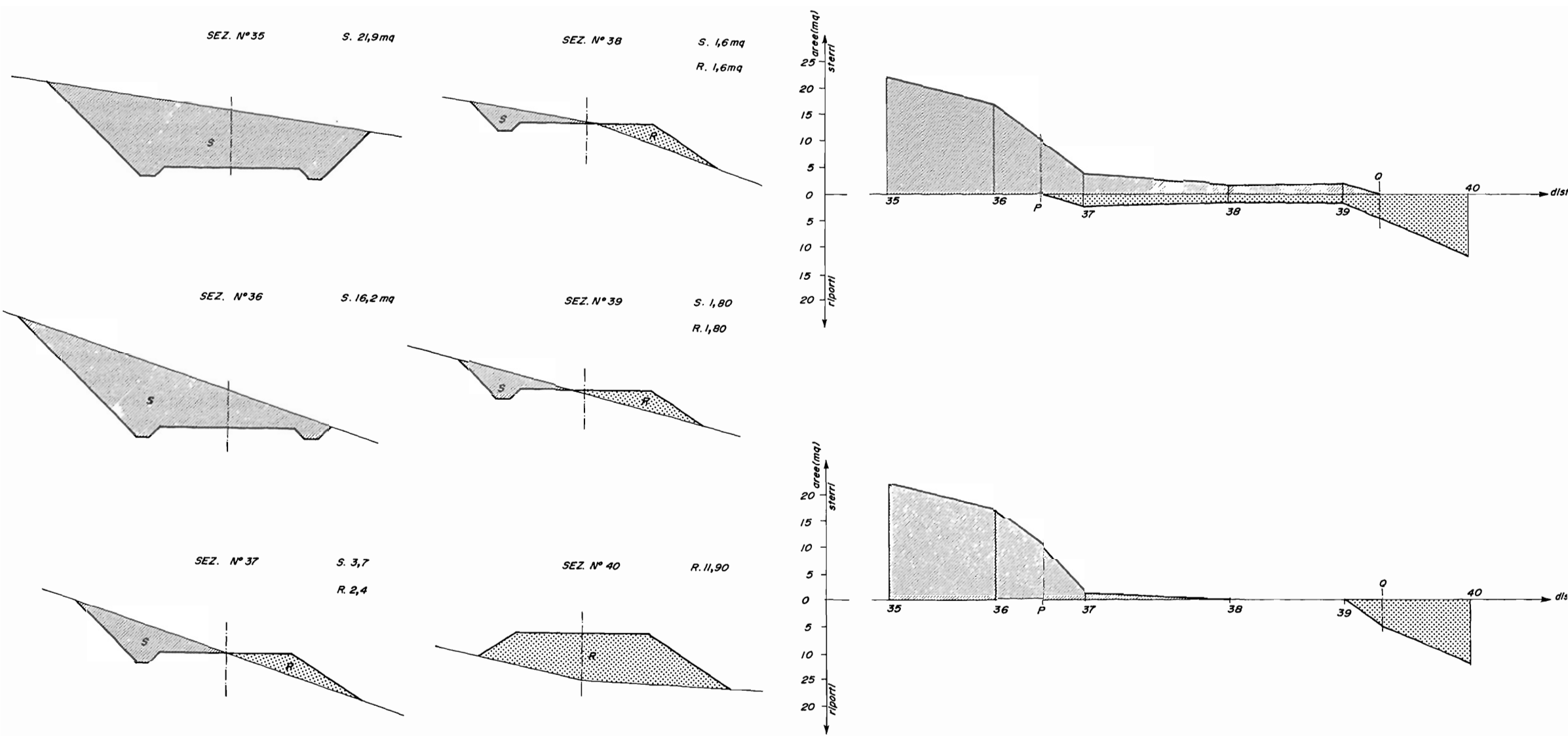


Fig. 38 - Diagramma delle masse (a) e delle masse depurate (b) con relative sezioni trasversali.
Diagram of the masses (a) and of the purified masses (b) with their transverse sections.

vamente alla prima zona e si riportano i segmenti S_1 in a e S in b; si traccia la normale all'ascissa nel punto P e si congiungono gli estremi di S_1 con S mediante una linea a tratti dall'estremo di S_1 al punto P' e continua dal punto P' al punto S. Si completa il diagramma sommando al segmento S_1 il segmento S_2 e il suo estremo si congiunge con P'.

2) Le sezioni sono entrambe miste

Il procedimento è simile al precedente. Scomposte le aree in tre sezioni si procede dalla seconda tracciando il diagramma incrociato con linea a tratti S_1-R_2 ; passando alla prima zona e collegando R con R_1 si ottiene il diagramma a linea continua congiungente P' con l'estremo dell'ordinata in b, somma di $R_1 + R_2$.

La terza zona viene riportata sul diagramma come la seconda tenendo conto del segno dell'ordinata.

Tracciato il diagramma delle masse, attraverso successive elaborazioni, è possibile determinare i tratti di strada, nei quali vi è compenso fra sterri e riporti, e i tratti in cui si riscontrano eccedenze o carenze di materiali. Per semplicità di esposizione non si considera la qualità delle materie che può modificare sostanzialmente il diagramma di compenso.

È utile ricordare che per compenso si intende l'equivalenza dei movimenti trasversali delle materie lungo l'asse del tracciato in maniera da non effettuare spostamenti in senso longitudinale.

Il grafico che riporta le eccedenze o le carenze dei volumi scavati prende il nome di diagramma delle masse depurate e si ottiene ribaltando intorno all'asse delle ascisse, i valori inferiori in senso relativo delle ordinate rappresentanti sterri o riporti, così da ottenerne le differenze residue. Nel diagramma così ricavato le ascisse rimangono pertanto invariate, mentre le ordinate rappresentano le eccedenze dei volumi scavati o le carenze delle materie necessarie a formare i rilevati.

Commentando la figura 38, che riporta un esempio numerico ma generico di diagramma di masse (a) e di diagramma di masse depurate (b), si osserva che nel tratto 36-37 del primo diagramma, in corrispondenza del punto P, cominciano i riporti di materie, mentre nella sezione 37 si riscontra ancora un'eccedenza residua di sterro, evidenziata in valore dalla corrispondente ordinata del diagramma (b), che rappresenta pertanto la differenza tra scavi e riporti, con i primi eccedenti rispetto ai secondi. In corrispondenza della sezione 38 l'eccedenza di scavi si azzera, perché in questo punto è nulla la differenza tra aree di scavo e di riporto: lungo il tratto 38-39 si hanno invece compensi trasversali.

Dalla sezione 39 e fino al punto Q si riscontrano eccedenze di riporti, ma con paleggio trasversale, mentre successivamente inizia un tratto in rilevato da formarsi con materie trasportate dall'esterno.

3.3.6. Diagramma dei volumi

Attraverso il diagramma delle masse depurate si conosce il compenso trasversale dei volumi: resta ora da stabilire dove è possibile e conveniente effettuare il compenso longitudinale. A tal fine è necessario costruire il profilo dei volumi eccedenti, detto anche di Brückner o dei momenti di trasporto, che rappresenta la somma algebrica dei volumi lungo il tracciato (positivi gli sterri negativi i riporti), in termini matematici ottenuta dall'integrazione del diagramma delle aree depurate. Per semplicità di esposizione, si tralascia la trattazione dell'aumento dei volumi delle terre cavate e delle distanze virtuali per i trasporti in salita.

Ai fini che interessano, viene ricordato che, indicando con $y = f(x)$ l'equazione della curva delle aree, l'incremento dei volumi dy per un tratto di ascissa $x + dx$ risulta

$$dy = f(x) dx \quad (19)$$

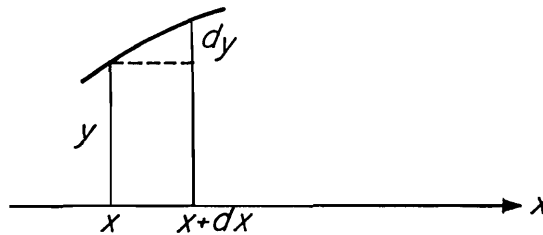


Fig. 39 - Integrale delle aree.
Integral of the areas.

L'ordinata y , che rappresenta la differenza tra i volumi di scavo e di riporto nel punto di ascissa x , si ottiene integrando la (19)

$$y = \int_0^x f(x) dx \quad (20)$$

Nota la funzione matematica della curva, si tratta di interpretare il significato reale dell'andamento del diagramma. Si precisa che l'esposizione che segue è riferita ad un diagramma delle aree nel quale il segno + viene attribuito ai volumi di sterro: ne consegue che nel diagramma dei volumi al ramo ascendente della curva corrisponde un'eccedenza longitudinale di sterro mentre al tratto discendente una eccedenza longitudinale di riporto. Se la curva è del tipo indicato nella figura 40, lungo il tronco 0-2 vi è eccedenza longitudinale di sterro, quantificata dall'ordinata y_2 misurata nel punto secondo la scala di riferimento.

Se invece l'andamento della curva è simile a quello della figura 41 significa che nel tronco 0-2 vi è compenso longitudinale, mentre nel tronco 0-3 vi è eccedenza di riporto pari all'ordinata y_3 .

I tratti nei quali esiste compenso, come nell'intervallo 0-2 della figura 41, vengono chiamati comunemente cantieri di compenso.

Analizzando la curva piú articolata di figura 42 si dimostra che è possibile avere piú

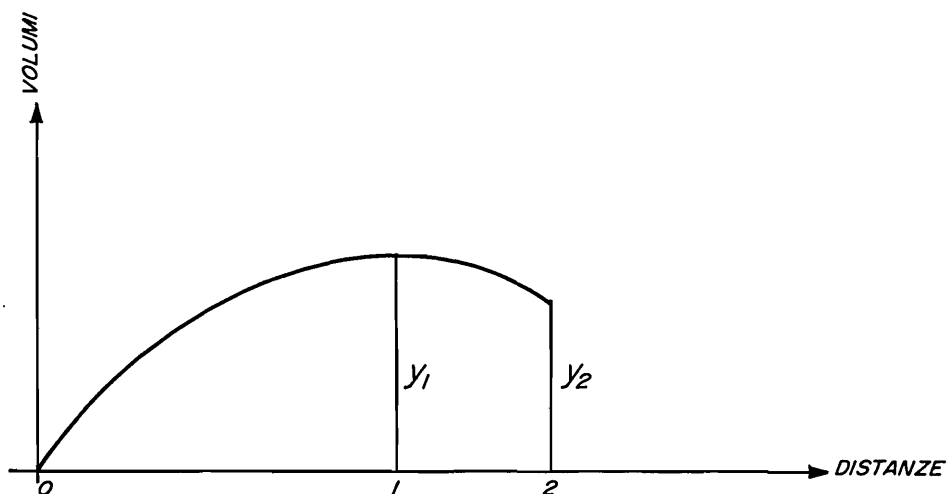


Fig. 40 - Diagramma dei volumi con esubero di sterro.
Diagram of the volumes with the excess from the cutting.

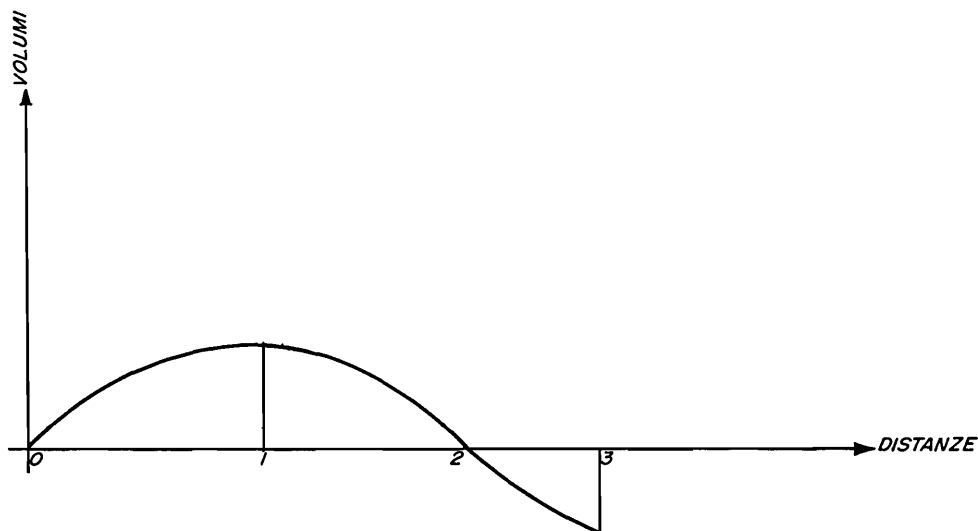


Fig. 41 - Diagramma dei volumi con esubero di riporto.
Diagram of the volumes with the excess from the embankment.

cantieri secondari di compenso a seconda delle distanze che si considerano. Infatti ogni tratto delimitato da una «valle» o da un «monte» e da una parallela alla orizzontale fondamentale costituisce un cantiere secondario di compenso.

Per valutare il costo dei trasporti, essendo questi compensati per quintale e per chilometro, è necessario determinare la distanza media di trasporto d_m nei cantieri di compenso. Tale distanza si ottiene dalla seguente espressione

$$d_m = \frac{A}{Y_{\max}} \quad 21)$$

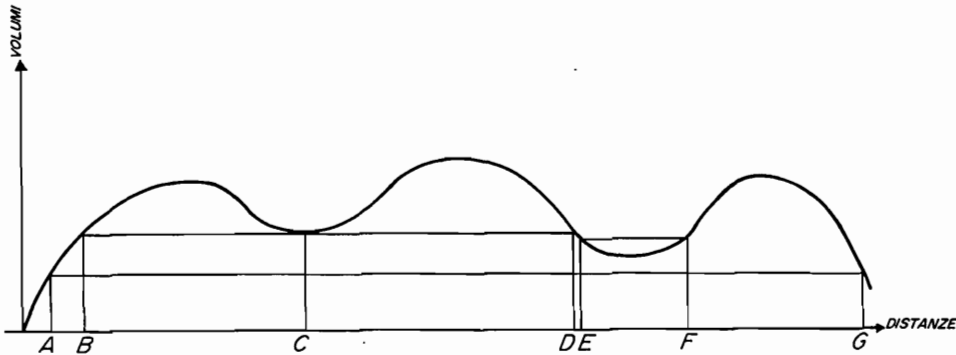


Fig. 42 - Diagramma dei volumi con cantieri secondari parziali nei tratti BC, CD, EF e principale nel tratto AG. Diagram of the volumes in the partial sections BC, CD, EF and the principal section AG.

in cui A rappresenta l'area racchiusa dalla curva dei volumi e dalla fondamentale, e

Y_{\max} è l'ordinata massima equivalente al volume di sterro utilizzato nei riporti (fig. 43).

Per la costruzione del diagramma dei volumi si ricorre talvolta a metodi grafici, molto più celeri rispetto al calcolo analitico e con risultati ugualmente attendibili. Tale asserito esclude naturalmente il calcolo per mezzo di computer, per motivi ovvi di affidabilità e speditezza maggiori. Il procedimento grafico consiste nella suddivisione del diagramma delle masse depurate nelle figure semplici che lo compongono, quali rettangoli, triangoli, trapezi, e nella esecuzione di ciascuna figura dell'integrazione grafica. I singoli casi elementari presenti nell'uso corrente, distinti per caso analitico e grafico, sono i seguenti.

a) Diagramma rettangolare delle aree

Due sezioni consecutive di area equivalente generano un diagramma a configurazione rettangolare.

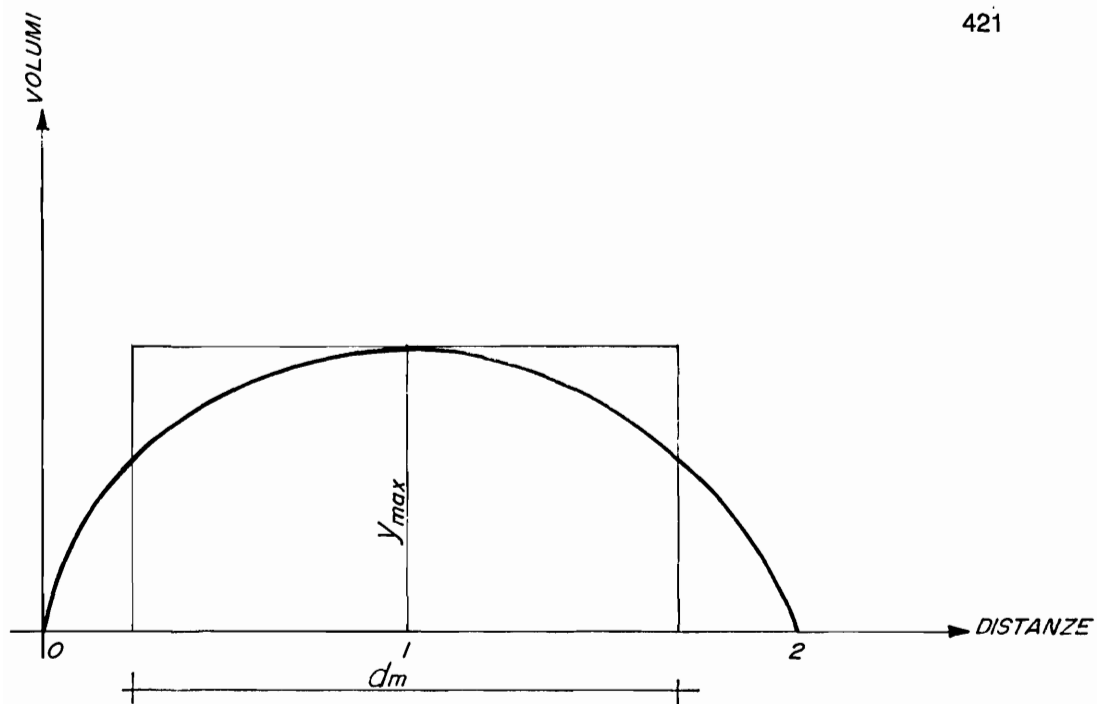


Fig. 43 - Cantiere di compenso.
Compensating section.

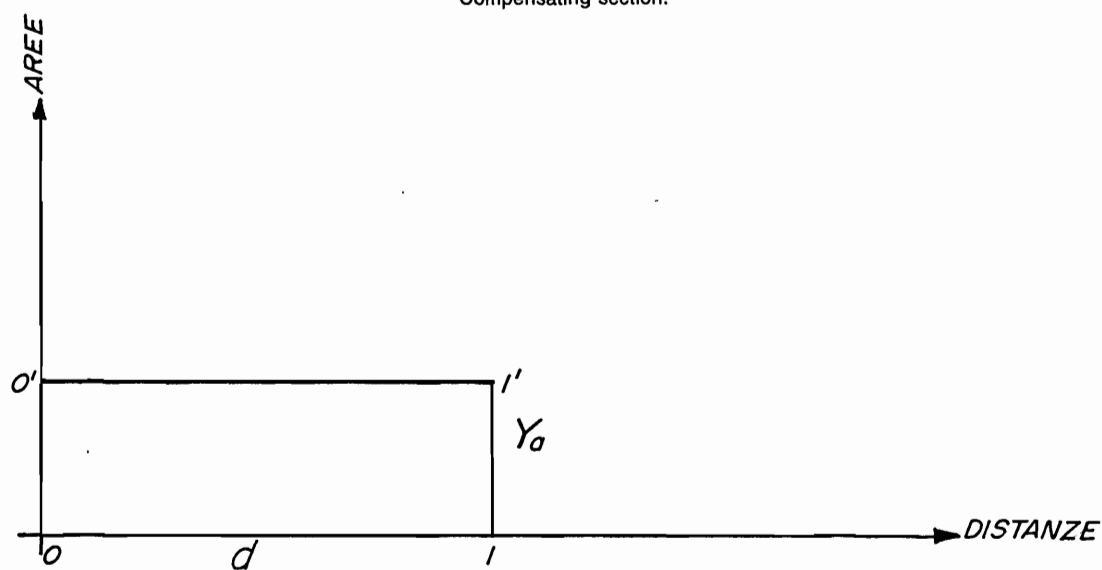


Fig. 44 - Diagramma delle aree nel caso di sezioni consecutive aventi aree equivalenti.
Diagram of the areas in the case of consecutive sections with equivalent areas.

Indicando con Y_a l'ordinata delle aree e con y l'ordinata dei volumi per la (20) si ottiene l'espressione analitica seguente

$$y = \int_0^x Y_a dx = [Y_a x]_0^d = Y_a d \quad 20')$$

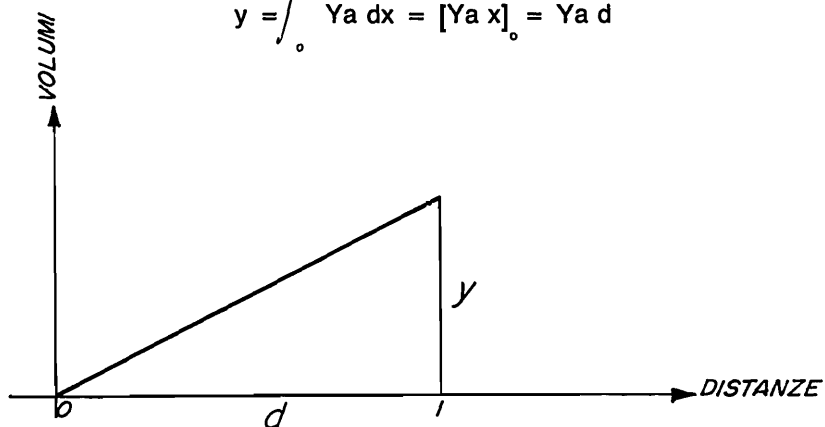


Fig. 45 - Diagramma dei volumi costruito con i valori analitici.
Diagram of the volumes constructed with analytical values.

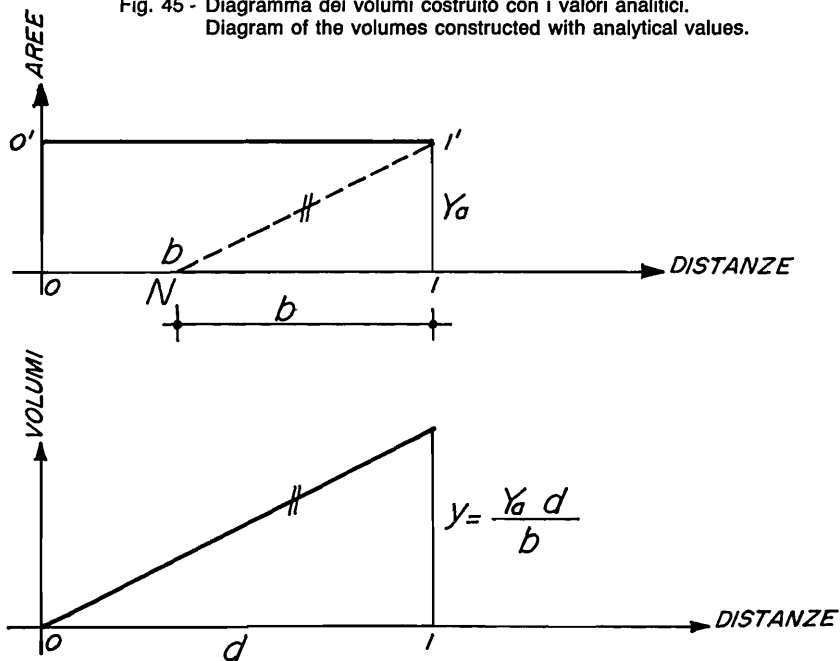


Fig. 46 - Costruzione grafica del diagramma dei volumi.
Graphic construction of the volume diagram.

Per eseguire l'integrazione grafica si riporta nel diagramma delle aree, a partire dal punto 1, la base di riduzione b fissata a piacere e si congiunge N con $1'$.

Per costruire il diagramma dei volumi si traccia da O la parallela a $N1'$: il punto d'intersezione con l'ordinata nel punto 1 consente di determinare il valore di y , che, in funzione della base di riduzione prescelta, rappresenta la somma dei volumi del tronco $O-1$.

b) Diagramma triangolare delle aree

Il diagramma delle aree è rappresentato da un triangolo quando una delle due sezioni consecutive ha area nulla. L'ordinata delle aree è data dall'equazione della retta

$$y_a = a x \quad (22)$$

in cui $a = \frac{Y_a}{d}$ rappresenta il coefficiente angolare di variazione, con

Y_a pari all'ordinata nel punto 1 distante d dall'origine ed x la distanza rispetto alla stessa origine del punto di ordinata generica y_a .

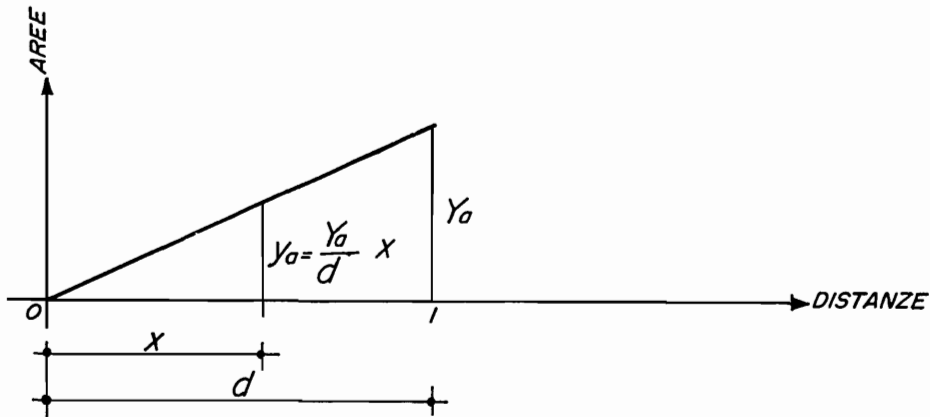


Fig. 47 - Diagramma delle aree in cui una sezione consecutiva ha area nulla.
Diagram of the areas in which a consecutive section has no area.

Integrando la (22) si ottiene l'ordinata dei volumi

$$y = \int_0^x a x \, dx \quad (20'')$$

che nel punto 1 assume il valore

$$y = \int_0^d y_a \, dx = y = \int_0^d \frac{Y_a}{d} x \, dx = \left[\frac{Y_a}{2d} x^2 \right]_0^d = \frac{Y_a d}{2} \quad (20''')$$

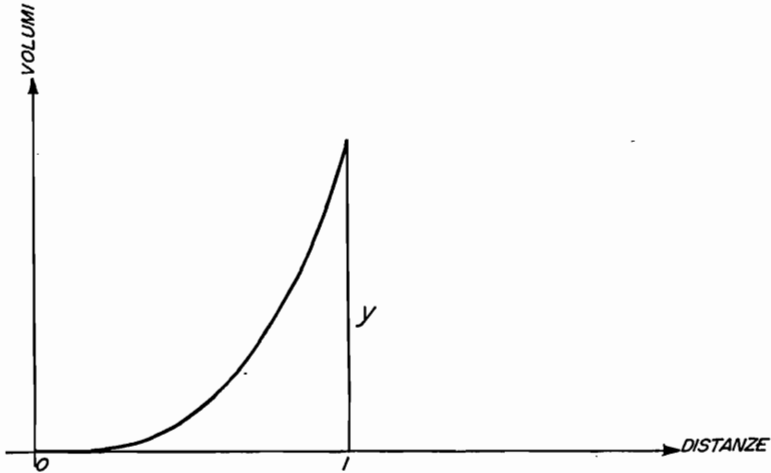


Fig. 48 - Diagramma dei volumi costruito con i valori analitici. Il diagramma ha andamento parabolico.
Diagram of the volumes constructed with analytical values. The diagram has a parabolic course.

La costruzione grafica del diagramma dei volumi, rappresentato da una parabola, si ottiene tracciando la parallela alla retta $N1'$ dal punto M distante $\frac{d}{2}$ da 0 o da 1, fino ad incontrare l'ordinata uscente da 1.

e) Diagramma trapezoidale delle aree

Tra due sezioni consecutive il diagramma delle aree presenta configurazione trapezoidale quando l'area delle due sezioni è disuguale.

L'ordinata y_a si ottiene dall'equazione

$$y_a = a x + b \quad 23)$$

in cui $a = \frac{Y_a'' - Y_a'}{d}$
 $b = Y_a'$

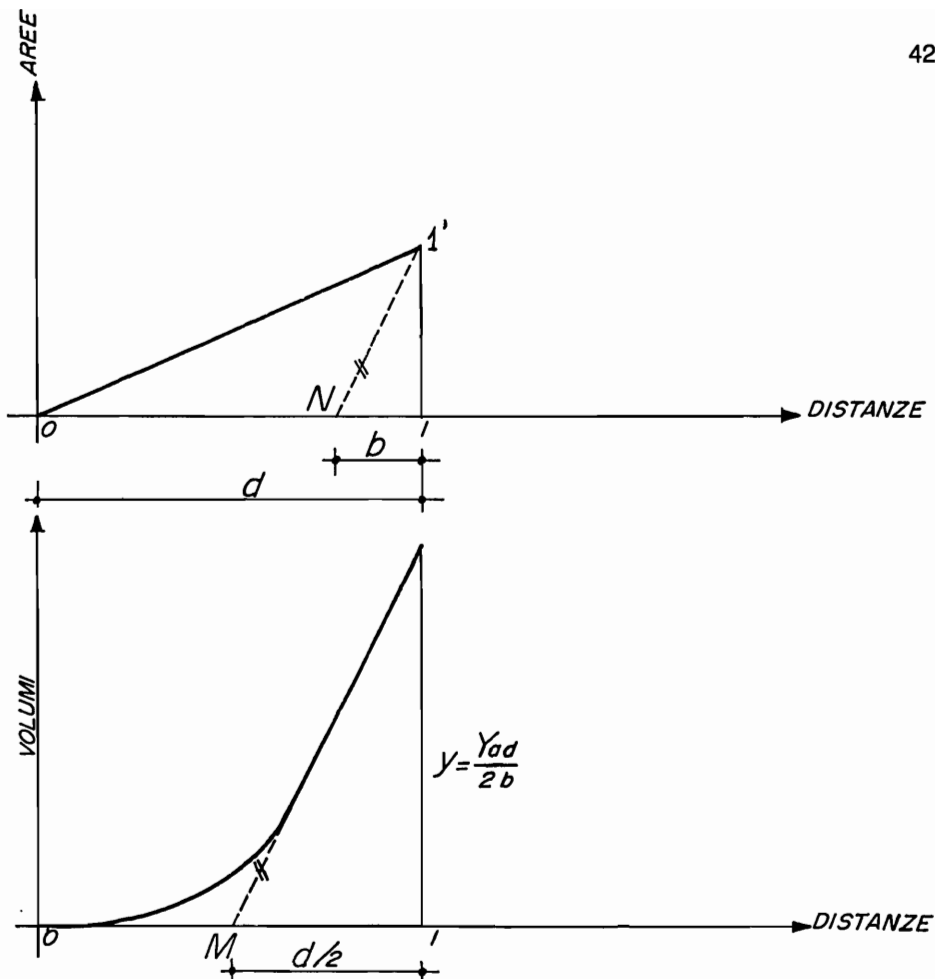


Fig. 49 - Costruzione grafica del diagramma dei volumi.
A graphic construction of the diagram of volumes.

L'ordinata dei volumi $y = \int_0^x y_a dx$ nel punto 1 assume il valore

$$y = \int_0^x \left(\frac{Y_a'' - Y_a'}{d} x + Y_a' \right) dx = \left[\frac{Y_a'' - Y_a'}{2d} x^2 + Y_a' x \right]_0^d = \frac{Y_a' + Y_a''}{2} d \quad (20''''')$$

La determinazione per via grafica del diagramma dei volumi ad andamento parabolico si ottiene riportando la base di riduzione in corrispondenza dei punti 0 e 1 del diagramma delle aree rispettivamente sino a N' e N : congiungendo questi con i punti O' e $1'$ si ottengono i segmenti $N'O'$ e $N1'$. Nel diagramma dei volumi si traccia dal punto 0 la parallela al segmento $N'O'$ fino ad incontrare l'ordinata di M in M' , e da

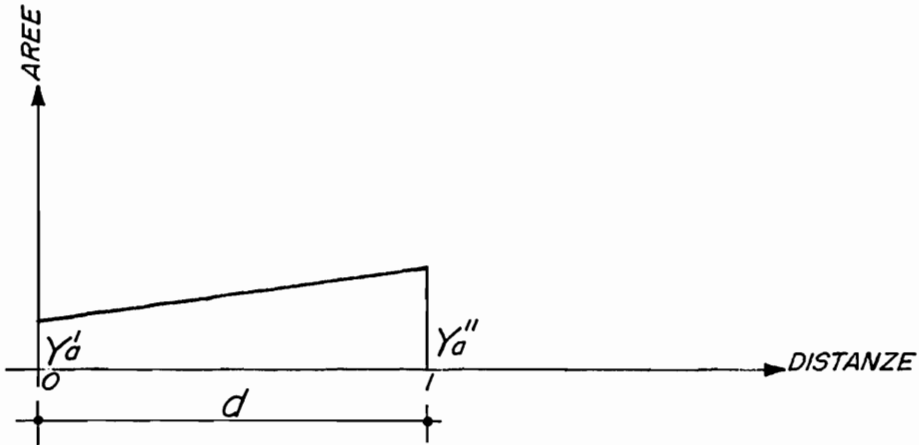


Fig. 50 - Diagramma delle aree con sezioni aventi aree disuguali.
Diagram of areas with sections having unequal areas.

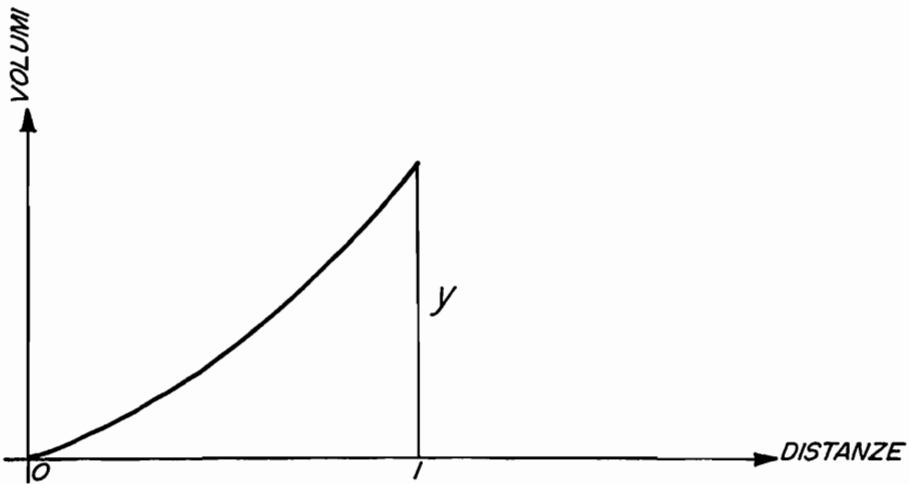


Fig. 51 - Diagramma dei volumi costruito con i valori analitici.
Diagram of volumes constructed with analytical values.

questo punto la parallela al segmento $N1'$ fino ad incontrare l'ordinata nel punto 1. Il diagramma parabolico dei volumi è così definito e determinato.

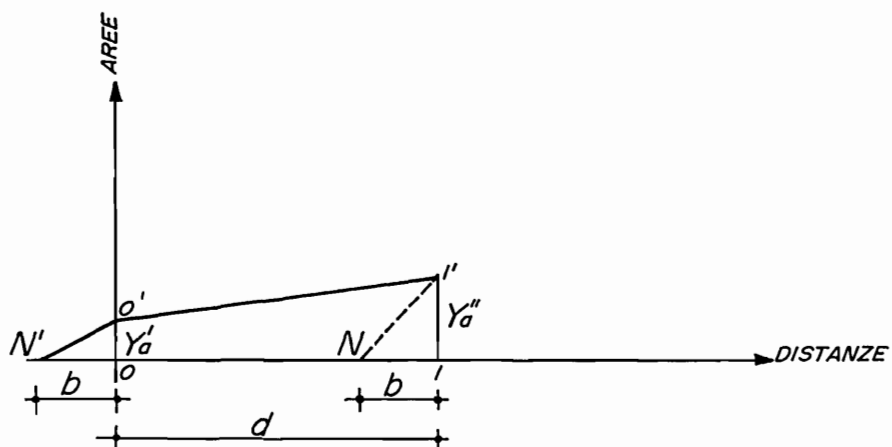


Fig. 52 - Costruzione grafica del diagramma dei volumi.
A graphic construction of the diagram of volumes.

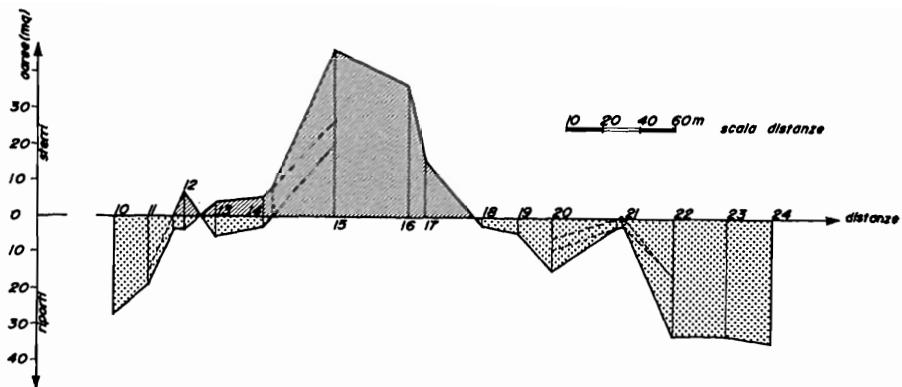


Fig. 53 - Diagramma delle masse.
Diagram of the masses.

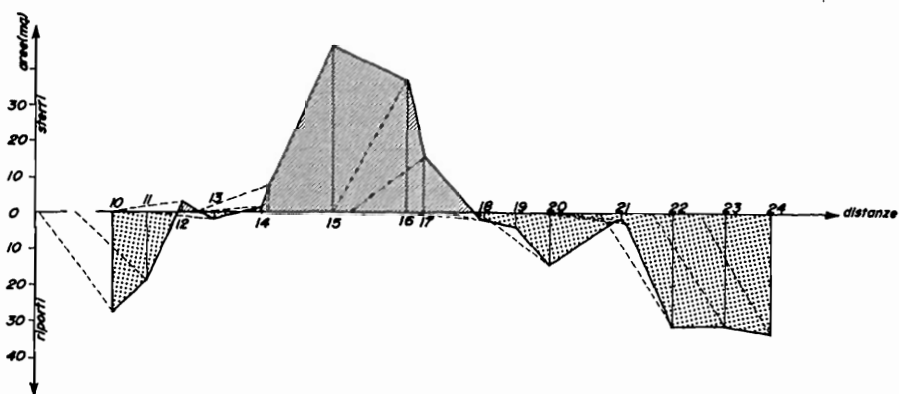


Fig. 54 - Diagramma delle masse depurate dei compensi trasversali. Le linee tratteggiate congiungono l'ordinata con la base di riduzione.
Diagram of the purified masses. The lines join the ordinate with the reductin base.

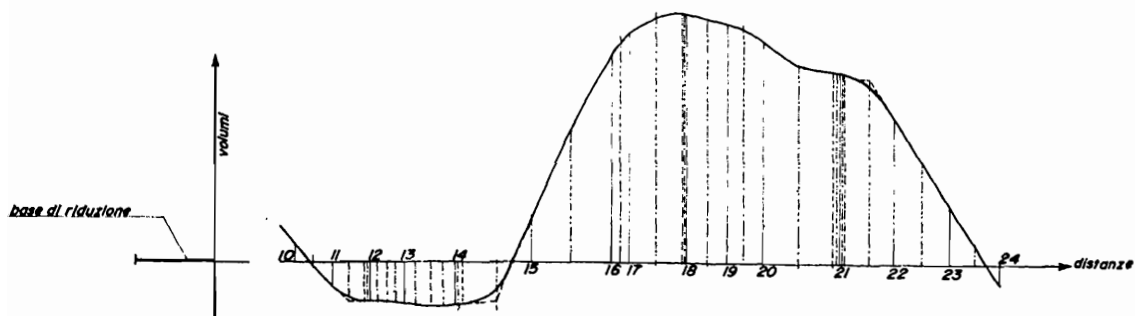


Fig. 55 - Diagramma dei volumi ottenuto per integrazione grafica.
Diagram of the volumes obtained for graphic integration.

4. ALCUNI SISTEMI DI TRACCIAMENTO DELLE CURVE STRADALI

Sembra ora opportuno ricordare alcuni aspetti relativi alla fase esecutiva delle strade, con particolare riferimento alle operazioni di tracciamento dell'asse stradale sul terreno. Per definire la posizione dei tratti curvilinei e trasferirne la configurazione lungo il tracciato, oltre i due punti di tangenza ed il vertice di ciascuna curva (elementi noti e determinati già in fase di progetto perché condizione sufficiente per procedere), occorre conoscere e fissare sul terreno la posizione di altri punti dell'asse viario: ciò è possibile mediante il posizionamento dei relativi picchetti, opportunamente ravvicinati a seconda del caso, in modo da conoscere l'andamento reale del raccordo. I sistemi di picchettamento utilizzati sono diversi: se ne ricordano alcuni tra i più diffusi.

4.1. Picchettamento per ordinate alla tangente

Il picchettamento per ordinate alla tangente, trova applicazione quando la curva è accessibile dall'esterno e si basa sul legame che le coordinate di un punto P della circonferenza hanno con il raggio attraverso l'equazione

$$x^2 + y^2 - 2Ry = 0 \quad 24)$$

Il tracciamento può essere condotto in due modi: per archi disuguali o per archi uguali.

a) Archi disuguali

Fissati arbitrariamente i valori della variabile x, si ricavano i corrispondenti valori di y mediante l'espressione

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad 24')$$

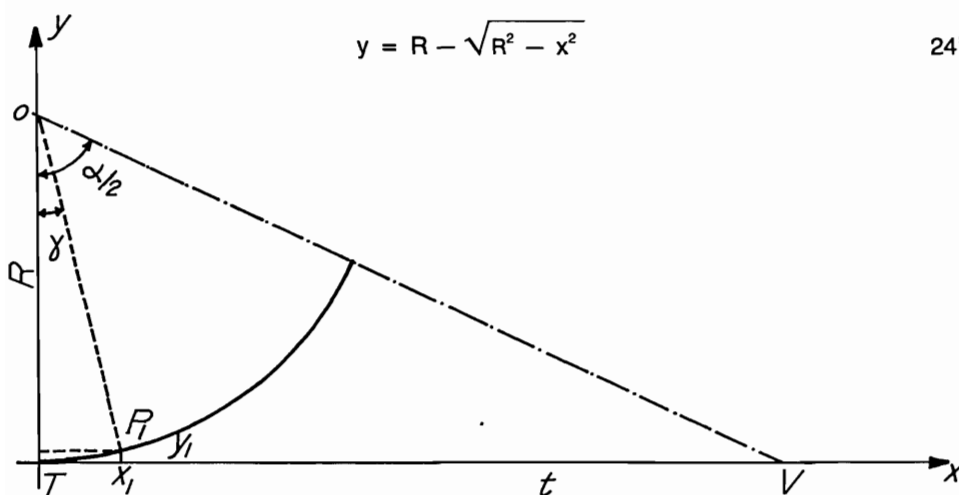


Fig. 56 - Picchettamento per ordinate alla tangente con archi disuguali.
Staking out following the ordinate to the tangent with unequal arcs.

b) Archi uguali

Si stabilisce il numero n di picchetti che si vuole disporre ad intervalli equidistanti su mezza curva, e indicando con γ l'angolo costante corrispondente all'arco compreso tra due picchetti consecutivi, si calcola il valore di γ con l'espressione

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{(n+1)} \quad (25)$$

Procedendo, utilizzando le relazioni sui triangoli rettangoli, si determinano le coordinate dei punti $P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, P_n$

$$P_1 \begin{cases} x_1 = R \operatorname{sen} \gamma \\ y_1 = R (1 - \cos \gamma) \end{cases} \quad (26)$$

$$P_2 \begin{cases} x_2 = R \operatorname{sen} 2 \gamma \\ y_2 = R (1 - \cos 2 \gamma) \end{cases}$$

.....

.....

$$P_n \begin{cases} x_n = R \operatorname{sen} n \gamma \\ y_n = R (1 - \cos n \gamma) \end{cases}$$

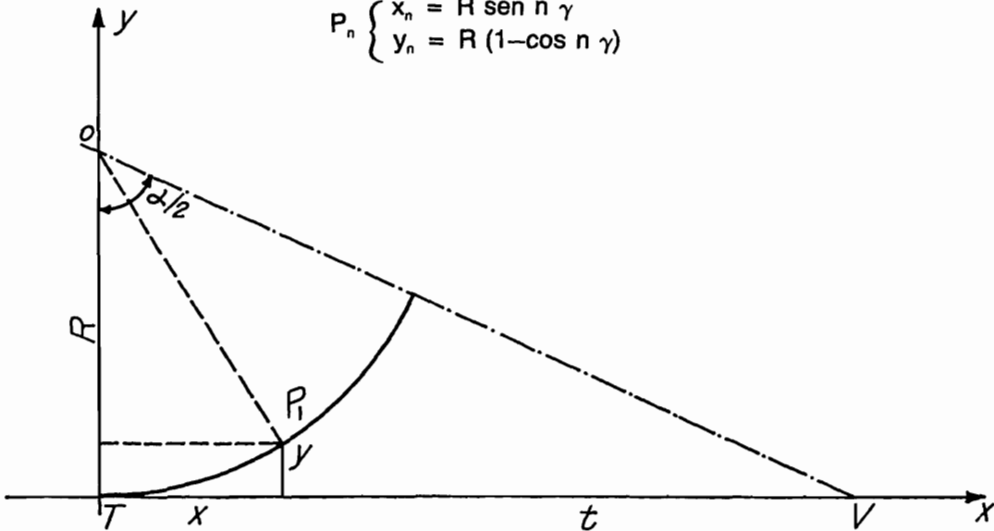


Fig. 57 - Picchettamento per ordinate alla tangente con archi uguali.
Staking out following the ordinate to the tangent with equal arcs.

4.2. Picchettamento per ordinate alla corda

Questo metodo si applica quando la curva è accessibile dall'interno, e si può picchettare ancora per archi uguali o per archi disuguali.

a) Archi disuguali

Si fissa arbitrariamente il valore della x e si calcola la y con l'espressione

$$y = s - (R - \sqrt{R^2 - x^2}) \quad (27)$$

in cui s è la saetta riferita alla rispettiva corda considerata.

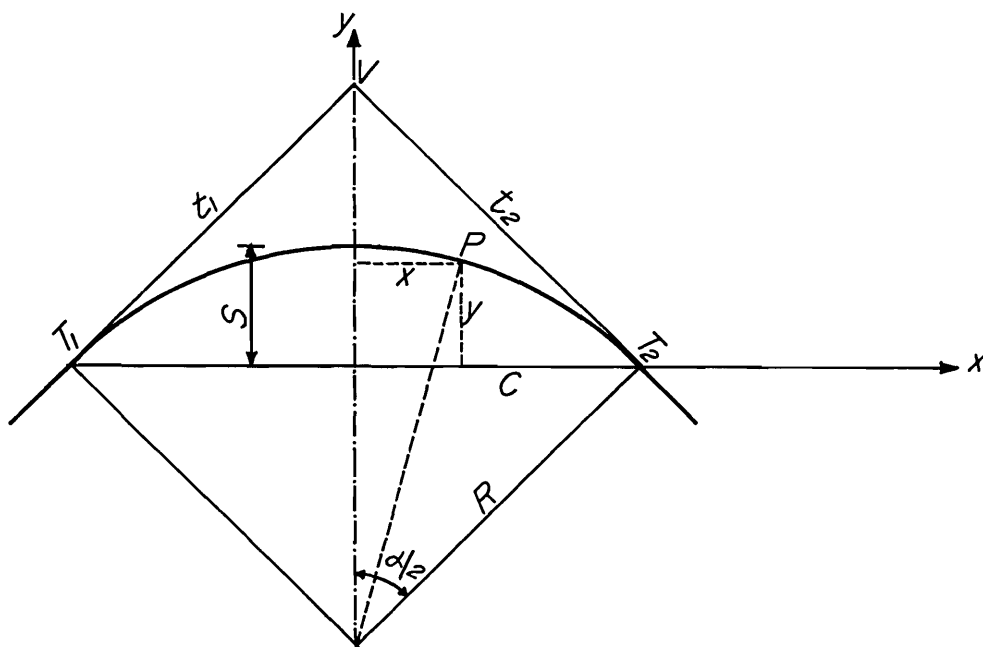


Fig. 58 - Picchettamento per ordinate alla corda con archi disuguali.
Staking out following the ordinate to the cord with unequal arcs.

b) Archi uguali

Anche in questo caso si tratta di fissare il numero dei picchetti che si vuole disporre lungo mezza curva, e di determinare attraverso la (25) il valore di γ .

Le coordinate dei punti $P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, P_n$ si ottengono dalle espressioni

$$P_1 \begin{cases} x_1 = R \operatorname{sen} \gamma \\ y_1 = s - R(1 - \cos \gamma) \end{cases} \quad 28)$$

$$P_2 \begin{cases} x_2 = R \operatorname{sen} 2 \gamma \\ y_2 = s - R(1 - \cos 2 \gamma) \end{cases}$$

.....

.....

$$P_n \begin{cases} x_n = R \operatorname{sen} n \gamma \\ y_n = s - R(1 - \cos n \gamma) \end{cases}$$

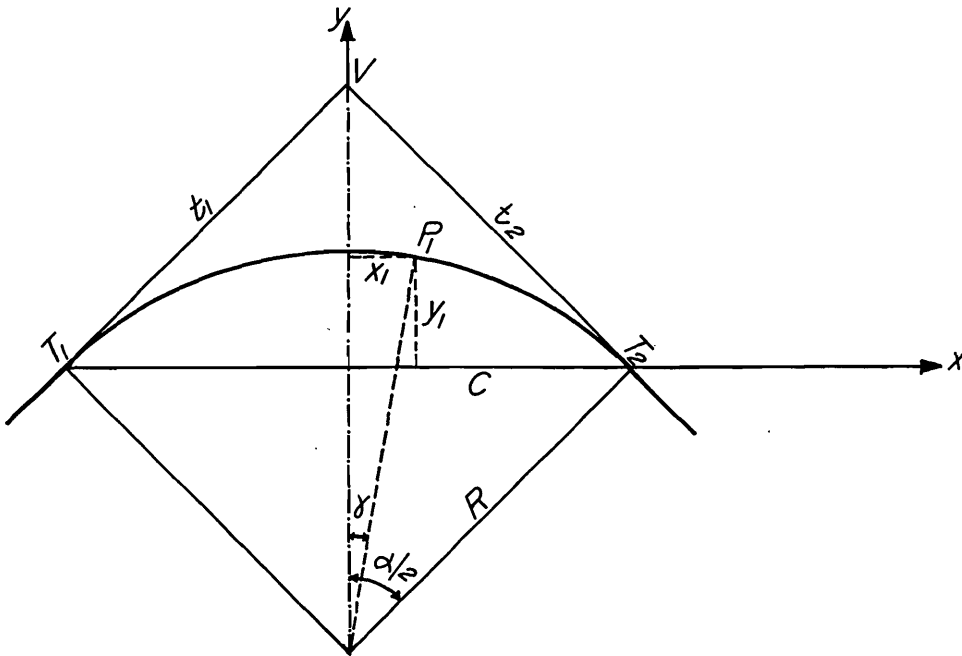


Fig. 59 - Picchettamento per ordinate alla corda con archi uguali.
Staking out following the ordinate to the cord with equal arcs.

4.3. Picchettamento per ordinate alle corde successive

Quando la curva da tracciare è accessibile solo lungo una striscia limitata dell'as-

se, come ad esempio nelle gallerie, viene tracciata per ordinate alle corde successive. Si procede sempre per archi uguali ed il metodo consiste nel determinare gli elementi T_1 , P_1 , Q , P_2 della figura 60, tenuto conto che T_1 , P_1 e Q sono sullo stesso allineamento.

Per stabilire la posizione del punto P_1 si calcola l'angolo γ con la (25) e successivamente per mezzo della (26), si determinano le coordinate x_1 e y_1 . Il triangolo $P_1 Q P_2$ è retto in Q e la sua ipotenusa $P_1 P_2$ rappresenta la corda il cui arco sotteso ha come angolo al centro γ ; è possibile così calcolare i suoi lati attraverso le espressioni

$$P_1 P_2 = C = 2 R \operatorname{sen} \gamma/2 \quad (29)$$

$$P_1 Q = C \cos \gamma \quad (30)$$

$$Q P_2 = C \operatorname{sen} \gamma \quad (31)$$

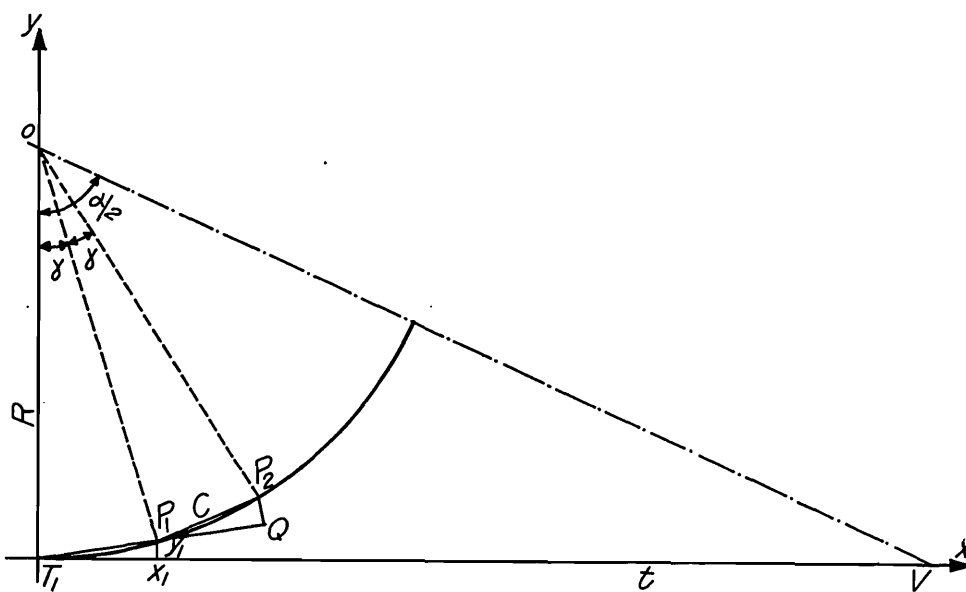


Fig. 60 - Picchettamento per ordinate alle corde successive.
Staking out following the ordinate to successive cords.

Il tracciamento dei successivi punti P_3, P_4, \dots, P_n si ottiene facendo coincidere di volta in volta i punti A, B, C, D della figura-guida 61 (e tali che $A \equiv T_1, B \equiv P_1, C \equiv Q$,

$D \equiv P_2$) rispettivamente con i punti P_1, P_2, Q, P_3 considerati questi ultimi nello stesso ordine e con le medesime modalità dei punti T_1, P_1, Q, P_2 . E così di seguito per tutti i punti successivi.



Fig. 61 - Schema di sagoma per il tracciamento dei punti successivi.
Plan of gauge for tracing successive points.

4.4. Picchettamento dei raccordi verticali

Nei raccordi verticali, lo sviluppo e i punti di tangenza vengono calcolati mediante l'introduzione del raccordo circolare, mentre il picchettamento sul terreno è più pratico venga eseguito a mezzo di un arco di parabola. Dall'equazione generale della parabola si ricava l'espressione

$$y = i x - \frac{\Delta i}{2 l_v} x^2 \quad (32)$$

in cui i è la pendenza, espressa in percentuale, della livelletta interessata dal raccordo,

x l'ascissa del generico punto P rispetto all'origine,

Δi la differenza delle pendenze in valore relativo,

l_v la lunghezza topografica del raccordo, calcolata con l'espressione $l_v = R_v i$.

Fissate due origini di riferimento in T e T' , attribuendo n e n' valori arbitrari alle variabili x e x' , si ottengono le ordinate

$$y_1, \dots, y_n$$

$$y'_1, \dots, y'_n$$

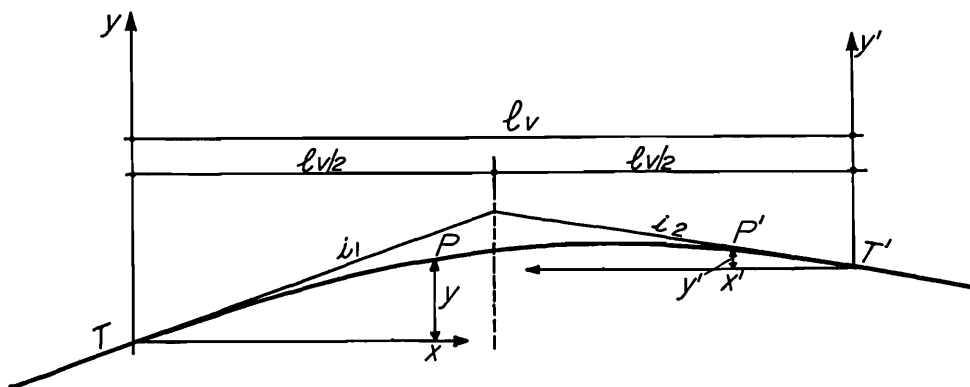


Fig. 62 - Assi di riferimento per il tracciamento del raccordo verticale ad arco di parabola.
Reference axes for tracing the vertical connection to the arc of the parabola.

La quota di progetto del punto P o P' si calcola invece sommando alla quota di progetto in T o T' l'ordinata y o y' del generico punto P o P' considerato. E pertanto risulta

$$Q_p = Q_T + y \qquad Q'_p = Q_{T'} + y' \qquad 33)$$

5. LE INFRASTRUTTURE VIARIE E IL PAESAGGIO

La realizzazione di un manufatto stradale, qualunque ne sia il livello e la destinazione, comporta comunque modifiche sostanziali dei luoghi interessati dall'intervento, e talvolta sono così accentuate ed importanti da alterare, se non persino compromettere, l'ambiente circostante. Tale aspetto richiama alcune considerazioni generali sul tema, che è possibile esporre e dal punto di vista figurativo e sotto il profilo percettivo, a seconda cioè che si guardi rispettivamente dall'esterno il manufatto stradale ed il passaggio, oppure che si osservi dal mezzo in transito l'ambiente circostante.

5.1. Aspetti figurativi

Anche le strade, come tutti i manufatti edilizi, ad un osservatore che si trova all'esterno, propongono immagini strettamente proprie ed immagini di esse nel contesto ambientale. La prevalenza delle une sulle altre dipende dalla distanza che separa l'osservatore dall'oggetto.

Nel tempo tra i progettisti delle strade si è consolidata la tendenza a privilegiare le caratteristiche tecnico-economiche del tracciato, mentre si è continuato a trascurare gli aspetti ambientali e formali. Infatti chi affronta i problemi viari è generalmente sollecitato dalla committenza a valutare e confrontare parametri di semplice convenienza e per lo più funzionali, quali i tempi di percorrenza, la capacità di traffico e la velocità di progetto. Aspetti, questi tutti quantificabili numericamente e in conseguenza facili da introdurre nelle convenzioni d'incarico professionale.

Uguale considerazione non può farsi invece sugli aspetti paesaggistici e ambientali, generalmente né considerati o neppure citati, se non in rari casi di strade a destinazione turistica.

L'esigenza di strade capienti e veloci e le nuove tecniche di realizzazione (il riferimento riguarda i mezzi meccanici impiegati per i movimenti di terra e i conglomerati cementizii utilizzati per la realizzazione delle opere d'arte) hanno cambiato volto ai manufatti viari. I mezzi meccanici, in grado di eseguire grandi movimenti di terra, troppo spesso arrecano danni irreparabili al patrimonio ambientale, mentre il calcestruzzo ha sostituito, con motivazioni di praticità e di economia, i materiali locali, quali la pietra a vista, che bene si armonizza con l'ambiente circostante. Progettare una strada, oggi, significa realizzare un complesso di manufatti da inserire nel contesto del territorio alla pari di uno o più edifici; perciò se ne deve curare ogni dettaglio formale, dalle scarpate alle opere d'arte, affinché si realizzi un'opera funzionale ma anche architettonicamente armoniosa nelle forme e correttamente inserita nel paesaggio.

5.2. Aspetti percettivi

Gli aspetti percettivi del manufatto stradale variano a seconda che il fruitore sia conducente del mezzo o passeggero. Il primo, attento alla traiettoria del veicolo, osserva ciò che si trova nella sfera e nella visuale della carreggiata; il secondo, invece, può seguire con lo sguardo qualsiasi immagine che gli desti interesse.

Affinché il pilota possa procedere con sicurezza e senza affaticarsi eccessivamente, è necessario che il tracciato sia facilmente individuabile senza ricorrere troppo alla segnaletica orizzontale e verticale. Per ottenere ciò occorre anzitutto mantenere la velocità di progetto pressoché costante per tutto il tracciato, evitare cambiamenti bruschi della pendenza longitudinale e ubicare le intersezioni in posizione ben visibile. Il passeggero generalmente è attratto dallo scenario del paesaggio che muta in continuazione di fronte ai suoi occhi per effetto dello spostamento del vettore di trasporto. La sua attenzione verso i dettagli dell'immagine è fortemente influenzata dalla velocità di spostamento.

È risaputo che con l'aumentare dell'andatura, diminuisce l'angolo del cono visivo e cresce la distanza di messa a fuoco del soggetto.

Con velocità ridotte il viaggiatore non impegnato nella guida può osservare anche il dettaglio del manufatto stradale, apprezzando positivamente o negativamente forme e colori a seconda della qualità delle immagini che gli si presentano lungo il percorso.

Il progettista, che non può disporre di modelli o prototipi, come avviene invece in altri settori della progettazione, deve cercare di coordinare tali complessi fattori con la fantasia e con il supporto di schizzi tridimensionali, confrontando mentalmente le sue idee con scenari di altre strade già realizzate. L'esperienza, la convinzione e l'impegno a voler contribuire a migliorare l'ambiente sono le motivazioni essenziali per l'inserimento corretto del manufatto stradale nel paesaggio.

6. ELABORATI DEL PROGETTO STRADALE

Prima di passare alle conclusioni finali, sembra utile ricordare, seppure per grandi linee, i tre momenti fondamentali nei quali si suole articolare il progetto di una strada (progetto preliminare, di massima, esecutivo), e indicare per ciascuno gli elaborati tecnico-amministrativi essenziali da predisporre, che riassumono in sintesi le fasi di cui si compone il progetto.

A) Progetto preliminare. Gli elaborati da predisporre sono:

- a. la planimetria generale, di solito in scala 1: 25.000, ma per tracciati brevi anche in scala maggiore (1: 10.000, 1: 5.000 ed anche 1: 2000),
- b. il profilo longitudinale,
- c. la relazione.

L'elaborato di maggiore interesse è certamente quest'ultimo, perché contiene le soluzioni progettate e le motivazioni delle scelte effettuate.

B) Progetto di massima. Gli elaborati da allegare sono:

- a. la planimetria generale,
- b. il profilo longitudinale e le sezioni trasversali,
- c. i disegni delle principali opere d'arte,
- d. la determinazione sommaria della spesa,
- e. la relazione generale.

Resta anche in tal caso confermata l'importanza della relazione generale, che riassume gli eventuali studi precedenti e dovrà contenere il maggior numero di informazioni possibili sulle soluzioni adottate, e sotto il profilo funzionale e dal punto di vista tecnico-economico.

C) Progetto esecutivo. I documenti prescritti dalle norme sono i seguenti, ma si segnala l'opportunità di predisporre ed allegare qualsiasi altro elaborato utile ad individuare ogni elemento di dettaglio del manufatto in progetto:

- a. la relazione generale, che richiamerà gli eventuali progetti preliminari e di massima, e sarà quanto più possibile particolareggiata,
- b. le planimetrie, delle quali una d'insieme in scala 1: 25.000 o 1: 10.000, una generale in scala 1: 2.000 o 1: 1.000 contenente il maggior numero di elementi, ed una di dettaglio nella quale sarà riportato soltanto l'asse stradale, insieme ai dati essenziali per il tracciamento,
- c. il profilo longitudinale, nelle scale opportune ed in particolare, com'è noto, assumendo per le altezze una scala dieci volte maggiore rispetto alla scala delle lunghezze,
- d. le sezioni trasversali, opportunamente numerate, e contenenti le indicazioni necessarie a definire ogni aspetto, comprese le aree delle parti in rilevato e/o in sterro; sull'elaborato inoltre è consigliabile indicare separatamente le sezioni tipo, chiamate anche «nominali»,
- e. il profilo geognostico con l'indicazione delle diverse qualità di terreno interessate dal progetto,
- f. il dettaglio degli attraversamenti di altre opere o di corsi d'acqua,
- g. la qualità ed i particolari delle opere d'arte da eseguire,
- h. il computo metrico delle diverse categorie di lavori, distinte per gruppi quali in sintesi
 - l'occupazione dei terreni con il piano particellare d'esproprio,
 - i movimenti, la distribuzione ed il trasporto delle terre,
 - le opere d'arte ed i lavori particolari,
- i. le analisi ed il relativo elenco dei prezzi,
- l. la stima globale dei lavori, articolata possibilmente in tre parti distinte, contenenti
 - l.1. le spese per compensi a corpo,
 - l.2. i lavori a misura,
 - l.3. le somme a disposizione, queste ultime suddivise a loro volta generalmente per
 - l.3.1. indennità di occupazione dei terreni,
 - l.3.2. lavori imprevisti,
 - l.3.3. lavori in economia,
 - l.3.4. revisione dei prezzi,
 - l.3.5. spese generali per direzione, assistenza ai lavori e I.V.A.
- m. i capitolati generale e speciale d'appalto.

Va ribadita e rafforzata l'opportunità di predisporre qualsiasi ulteriore elaborato, utile al chiarimento di specifici elementi di dettaglio, soprattutto nel caso di manufatti stradali di particolare difficoltà esecutiva, o di opere d'arte a corredo di forma e natura singolare, che esulano dalla progettazione corrente di routine.

Tale discrezionalità è affidata alla coerenza e alla preparazione del progettista e, non rispondendo a norme canoniche e particolari di metodo, dipende appunto esclusivamente dalla sensibilità e dal buon senso del tecnico che coordina la progettazione.

7. CONCLUSIONI

Le brevi considerazioni finali riflettono con coerenza il filo conduttore percorso nello svolgimento del tema, che come accennato in premessa tratteggia semplicemente i momenti salienti in cui si articola la progettazione stradale, riassumendone in sintesi gli aspetti analitici e tecnici, e sviluppandone invece con più attenzione e maggiore dettaglio la parte grafica a documentazione e supporto dei primi.

Certamente gli elementi presi a riferimento non esauriscono l'argomento nella sua complessità e completezza, né ogni aspetto considerato è stato sviluppato in misura globale ed esauriente.

Lo studio si limita a proporre un raccordo di sintesi, che rappresenti nella sua concretezza e brevità (naturalmente relativa rispetto all'ampiezza degli argomenti) motivo di riflessione e di compendio sull'insieme dei temi trattati, e che inoltre tratteggi in maniera essenziale e riassuntiva le principali operazioni da eseguire nella progettazione delle strade.

L'intento è forse più didattico e divulgativo che di ricerca originale in assoluto, ma potrà comunque essere utile a tutti, ed in particolare a quanti troppo spesso con praticità eccessiva trascurano di dare il necessario rigore professionale alla loro attività di progettisti.

BIBLIOGRAFIA

- DEL GAUDIO A., 1986 - Nuovo corso di Topografia - Calderini.
 AGOSTINI A., 1983 - Nuovo corso di Topografia - Vol. III, Hoepli.
 TESORIERE G., 1983 - Strade ferrovie aeroporti - Vol. I, UTET. Torino.
 FERRARI P., GIANNINI F., 1983 - Geometria e progetto di strade - Vol. I, A. Mondadori.
 BONFIGLI C., SOLAINI L., 1982 - Trattato di Topografia - Vol. III, Le Monier Firenze.
 ORMEA G.B., 1982 - Teoria e pratica nelle costruzioni - Vol. III, Hoepli.
 MONARDO L., 1981 - Pianificazione e tecnica delle infrastrutture stradali - Università di Roma. Facoltà di Architettura.
 Bollettino Ufficiale del CNR n. 78 del 28.7.1980.

RESNICK R., HALLIDAY D., 1979 - Fisica - Vol. I, Ambrosiana. Milano.

Bollettino Ufficiale del CNR n. 31 del 28.3.1973.

BOAGA G., 1972 - Disegno di strade - Officina Edizione, Roma.

DRAGONETTI, PROCINO, ROSSI - Topografia e disegno topografico - A.P.E. Mursia