



**STUDIO DEL PROFILO LONGITUDINALE IN  
RELAZIONE ALLA NATURA DEI TERRENI E ALLA  
DISPONIBILITÀ DI CAVE**

**Mauro Coni**

Dipartimento di Ingegneria del Territorio - Università degli Studi di Cagliari  
Piazza d'Armi, 09123 Cagliari  
Tel: +39 070.6755275 - Fax: +39.070.6755266  
E-mail: mconi@unica.it

**Maria Paola Carboni**

Dipartimento di Ingegneria del Territorio - Università degli Studi di Cagliari  
Piazza d'Armi, 09123 Cagliari  
Tel: +39 070.6755275 - Fax: +39.070.6755266

# **STUDIO DEL PROFILO LONGITUDINALE IN RELAZIONE ALLA NATURA DEI TERRENI E ALLA DISPONIBILITÀ DI CAVE**

**MAURO CONI** - Dip. Ing. del Territorio – Università degli Studi di Cagliari

**MARIA PAOLA CARBONI** – Dip. Ing. del Territorio – Università degli Studi di Cagliari

## **SOMMARIO**

L'obiettivo della memoria è quello sviluppare un metodo per la determinazione delle livellette stradali che tenga conto della distribuzione delle cave disponibili sul territorio e della natura dei terreni attraversati. Questi aspetti non sono sempre tenuti nella dovuta considerazione nelle procedure della progettazione tradizionale e, tuttavia, influiscono notevolmente sui costi delle opere e sull'impatto ambientale. La ricerca riveste particolare interesse nelle regioni con intensa attività estrattiva, per l'esigenza di un riuso produttivo delle cave dismesse e degli scarti accumulati. I benefici deriverebbero dal riciclaggio dei materiali di scarto, dal limitare l'apertura di nuove cave di prestito e dall'impiego delle cave dismesse come cave di rifiuto. La ricerca ha condotto ad una metodologia di analisi, resa operativa mediante un software di calcolo, che, in funzione delle caratteristiche del terreno e dei costi di approvvigionamento e scarica, dipendenti dalla distribuzione territoriale delle cave, permette di stimare i costi di realizzazione di diverse livellette evidenziando quella di minor costo. Del metodo elaborato vengono proposte differenti applicazioni relative ai lavori di ammodernamento della S.S. n°131. La modalità operativa proposta mostra che la soluzione tradizionalmente perseguita, di perfetto compenso di materia, è la più economica solo in alcuni casi. Dalla ricerca è emerso che il profilo longitudinale ottimizzato con la metodologia proposta consente in genere una riduzione dei costi dei movimenti terra compresa tra il 5 e il 15%.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to define a method to determine road gradients that should take into account the distribution of borrow pits and waste quarries available on the territory, and the type of ground crossed. These aspects are not always sufficiently taken account of in traditional planning procedures, nevertheless they significantly affect the building costs and the environmental impact of roads. The benefits of this research would derive from the recycling of waste materials, from the opening of new borrow pits, and from the use of abandoned quarries as waste quarries or provisional deposits of suitable though redundant excavation materials. In this research an analysis methodology that was made operative by means of calculation software was carried out. Thanks to this software, which is dependent on the ground characteristics and on supply and dumping costs, that are a function of the distribution of the quarries on the territory, it is possible to estimate the cost of building different road gradients and determining the cheapest among them. A number of different applications of the method relating to renovation works on the S.S. 131 road is proposed. The proposed operating modality shows that the solution of perfect compensation of material pursued according to tradition is the cheapest only in a few cases. From the research it emerged that the longitudinal profile optimised with the proposed methodology allows a reduction in earth movement costs of between 5 and 15%.

## 1. INTRODUZIONE

In futuro, un aspetto critico delle infrastrutture viarie sarà rappresentato dalla qualità della progettazione e dall'efficienza costruttiva nei movimenti di materia. Il rispetto dell'ambiente, la necessità di riciclare gli scarti, lo sfruttamento delle cave dismesse hanno prodotto la consapevolezza che la sostenibilità della rete infrastrutturale è strettamente legata alle future innovazioni che verranno introdotte in tutti gli aspetti tecnici, economici e ambientali dei movimenti di materia nei cantieri stradali.

Nella tradizionale prassi progettuale non sempre si perseguono procedure integrate capaci di individuare l'asse plano-altimetrico che meglio corrisponda ai livelli di funzionalità prefissati e ai vincoli tecnici, economici ed ambientali.

Usualmente, dopo aver individuato diverse alternative geometriche della poligonale d'asse, si procede allo studio del profilo longitudinale. La disposizione delle livellette viene eseguita rispettando i vincoli di quota imposti dalla presenza delle intersezioni con la rete viaria esistente e con il reticolo idrografico. Il criterio base è quello di realizzare, se i materiali di scavo sono idonei, il compenso tra gli sterri e i riporti. Tuttavia nessun'altra indicazione scaturisce dalla letteratura tecnica [1] [2] [3] [4] nel caso in cui i materiali di scavo non siano idonei a costituire i rilevati. Pertanto, talvolta si assiste alla costruzione del profilo longitudinale indipendentemente dalla natura dei terreni di scavo con una grande variabilità di costo tra i diversi profili longitudinali.

Ulteriore aspetto che non viene considerato è la distribuzione territoriale delle cave di prestito e di rifiuto. Pertanto, in prossimità di cave attive si avrà una maggiore convenienza economica nell'avere rilevati mentre in corrispondenza di sezioni in scavo sarebbe meno costoso poter disporre di cave di rifiuto riutilizzando quelle dismesse. I benefici che deriverebbero dalla risoluzione del problema sono, oltre che di natura economica, anche di carattere ambientale. In tale senso sono orientati anche i più recenti interventi normativi. La Legge Quadro in Materia di Lavori Pubblici n°109/1994 e il suo Regolamento di Attuazione prescrivono in modo chiaro (agli art. 15, 26, 29, 71, 130 e 173) che le progettazioni devono contenere la localizzazione delle cave, la valutazione del tipo e della quantità di materiali. Anche lo "Studio di Impatto Ambientale" e lo "Studio di Fattibilità Ambientale", sono redatti contestualmente al progetto definitivo anche con riferimento all'ubicazione delle cave e delle discariche.

Esistono, dunque, due esigenze: la prima deriva dalla ricerca del minimo costo dei movimenti di materia, la seconda si riferisce alla necessità di pianificare e programmare i movimenti di materia al fine di ridurre l'impatto sull'ambiente.

Il processo progettuale attualmente perseguito consegue tale risultati attraverso un processo iterativo dove tutti gli elaborati vengono redatti e concorrono a definire il conto economico finale dell'infrastruttura [5] [6] [7] [8]. La sensibilità del progettista e la sua esperienza risultano fondamentali nell'individuazione dell'asse plano-altimetrico della strada che, per una data orografia, localizzazione delle cave, terreni di fondazione, punti plano-altimetrici obbligati, individua ad una possibile soluzione. Infine, vengono poste a confronto alcune differenti alternative progettuali comparandone i costi, i pregi e gli svantaggi. Si perviene alla definizione dei costi complessivi solo dopo aver sviluppato la progettazione in tutte le sue fasi, "ritoccando" e "aggiustando" l'asse plano-altimetrico e il relativo solido stradale. Difficilmente nella definizione dell'asse vengono operativamente computati i differenti costi legati alle diverse alternative di profilo e ancor meno viene considerata la distribuzione territoriale delle cave.

Le più recenti tendenze nel campo della progettazione geometrica [9] e nei movimenti di materia [10] pongono come temi centrali per il prossimo futuro

l'innovazione delle tecniche progettuali e in particolare la progettazione flessibile. Questa, sensibile al contesto complessivo, tende a un approccio sistemico e integrato che riassume in sé le esigenze di efficienza, di sicurezza, di rispetto dei valori ambientali.

Il tema affrontato nella memoria e la metodologia proposta vogliono essere un contributo in tal senso.

## 2. METODOLOGIA PROPOSTA

Salvo rare eccezioni, la realizzazione di una nuova strada comporta sempre grandi movimenti di terra, dovuti sia all'approvvigionamento dei materiali necessari alla costruzione sia all'eventuale discarica di quelli inidonei. Un indicatore per valutare l'impatto prodotto sull'ambiente dall'opera stradale è la quantità di scavi e di rilevati prevista nel progetto. E' evidente che quanto maggiori sono i volumi dei movimenti di terra tanto maggiore è l'impatto esercitato. Inoltre, quanto più alta è la compensazione tra scavi e riporti tanto più l'impatto è limitato alla sola infrastruttura stradale. Viceversa, il limitato riuso dei materiali scavati, determina un impatto esteso al di fuori dalla sede stradale, sia per l'approvvigionamento di materiali per i rilevati sia per la discarica di materiali scadenti. La ricerca del compenso tra scavi e rilevati risulta vantaggiosa anche dal punto di vista economico. Poter riutilizzare i materiali scavati evita sia i costi di approvvigionamento da cave di prestito sia quelli di conferimento alle cave di rifiuto. E' chiaro, quindi, che limitare al minimo i movimenti di terra, ricercando sempre il compenso, risulta indispensabile se si vuole realizzare un progetto stradale rispettoso dell'ambiente e economicamente vantaggioso.

Si consideri il tratto di strada di lunghezza  $d$ , compreso tra la sezione  $1$  e la sezione  $n$ , in corrispondenza del quale la sezione verticale del terreno, che può essere approssimato da una serie di trapezi, abbia l'andamento mostrato in Figura 1. Siano  $h_i$  la quota e  $x_i$  la progressiva della generica sezione  $i$ , compresa tra  $1$  e  $n$ . L'area totale, compresa tra la sez.  $1$  e la sez.  $n$ , è la somma delle aree elementari  $A_i$ :

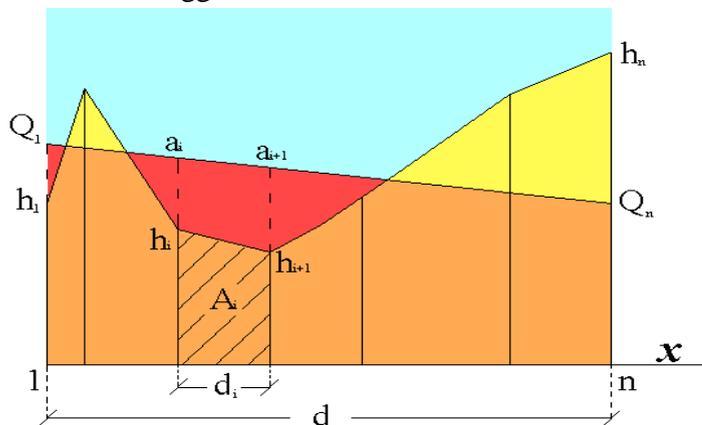


Figura 1 – Profilo longitudinale

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} A_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \cdot d_i$$

La posizione della livelletta che realizza il compenso tra le aree longitudinali di sterro e riporto può essere determinata osservando che il sistema, descritto in Figura 1, è chiuso, dal quale non si può prelevare o immettere terra. L'area sottesa dalla spezzata che descrive il terreno dovrà, pertanto, rimanere invariata dopo aver realizzato la livelletta. In questo caso l'area sottesa tra le quote di progetto e quella del piano a quota  $Q = 0.00$  m, vale:

$$\frac{Q_1 + Q_n}{2} \cdot d = A$$

È possibile risolvere due problemi:

1) determinare la pendenza della livelletta di compenso, nota la quota iniziale:

$$Q_n = \frac{2 \cdot A}{d} - Q_1$$

2) determinare le quote, iniziale e finale, che realizzano il compenso con una data pendenza della livelletta

$$Q_1 = \frac{A}{d} - \frac{pd}{2} \qquad Q_n = \frac{A}{d} + \frac{pd}{2}$$

La quota  $a_i$  della livelletta in corrispondenza della sez.  $i$ , sarà  $a_i = Q_{iniziale} + p \cdot (x_i - x_1)$

## 2.1 Il calcolo delle aree e dei volumi

Per rendere operativa una procedura automatica, implementabile in un codice di calcolo, occorre esplicitare nei differenti casi le espressioni ricorsive necessarie al calcolo delle aree longitudinali e dei volumi. Nella trattazione seguita si intendono per aree longitudinali le figure piane comprese tra la linea del terreno e quella di progetto in senso longitudinale. Se si considera il tratto compreso tra la sezione  $i$  e la sezione  $i+1$ , in funzione della posizione reciproca assunta dalla livelletta rispetto al terreno, si potranno verificare i quattro diversi casi illustrati in Figura 2.

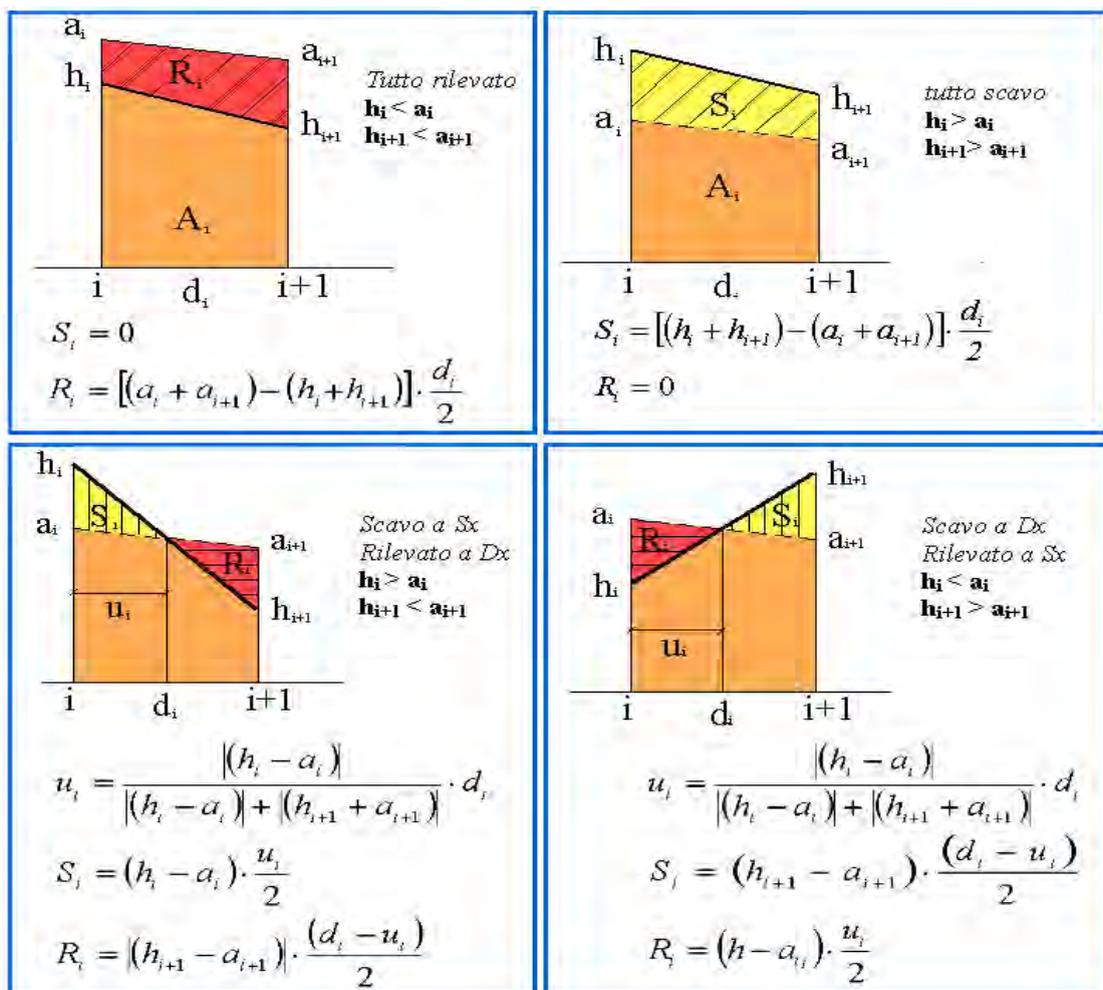
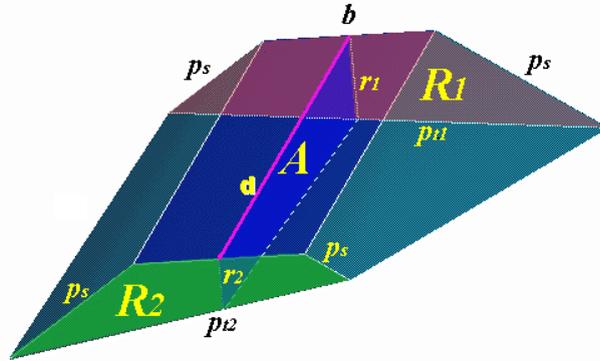


Figura 2 – Calcolo delle aree longitudinali

Le espressioni riportate sono valide qualunque sia la posizione della livelletta e consentono il calcolo delle aree di scavo e di rilevato longitudinali. In realtà ciò che interessa è il computo dei volumi. Generalmente si perviene alla loro determinazione valutando le aree di scavo e rilevato trasversali e computando il volume del solido tra esse comprese nell'ipotesi di variazione lineare della sezione [1].



Per  $i=1$

$R_1$  = area trasversale nella sez. 1

$R_2$  = area trasversale nella sez. 2

$A$  = area longitudinale tra le sez. 1 e 2

$r_1$  = quota rossa nella sez. 1

$r_2$  = quota rossa nella sez. 2

$d$  = distanza tra la sez. 1 e 2

$p_s$  = pendenza delle scarpate

$p_{t1}$  = pendenza del terreno nella sez. 1

$p_{t2}$  = pendenza del terreno nella sez. 2

Figura 3 – Schema geometrico tradizionale

$$V_i = \frac{d_i}{6} (R_i + R_{i+1} + 4R_{m_i}) \cong \frac{(R_i + R_{i+1})}{2} d_i = R_{m_i} d_i \quad \text{con } R_{m_i} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2}$$

È possibile procedere in modo differente valutando il volume del prisma retto di base  $A_i$  e larghezza media trasversale  $h_m$ . Nota l'area longitudinale  $A_i$  il volume di rilevato compreso tra la sezione  $i$  e la sezione  $i+1$  vale:  $V_i = A_i h_{m_i}$ . Il volume, comunque venga computato, deve essere lo stesso; vale, pertanto l'eguaglianza:

$$V_i = R_{m_i} d_i = A_i h_{m_i}$$

ed essendo

$$A_i = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} d_i$$

si ha:

$$R_{m_i} d_i = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} d_i h_{m_i}$$

da cui:

$$R_{m_i} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} h_{m_i}$$

In definitiva la larghezza media trasversale tra le sez.  $i$  e  $i+1$  vale:

$$h_{m_i} = \frac{2R_{m_i}}{r_i + r_{i+1}} = \frac{R_{m_i}}{r_{m_i}}$$

essendo  $r_{m_i} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$  l'altezza media delle quote rosse tra la sezioni  $i$  e  $i+1$ .

In altri termini la larghezza media tra le sezioni è pari al rapporto tra la media delle aree trasversali delle due sezioni omogenee e la media tra le quote rosse. Si dimostra che l'errore commesso è pari a  $\frac{1}{2}$  di quello prodotto con il metodo delle sezioni ragguagliate e che:

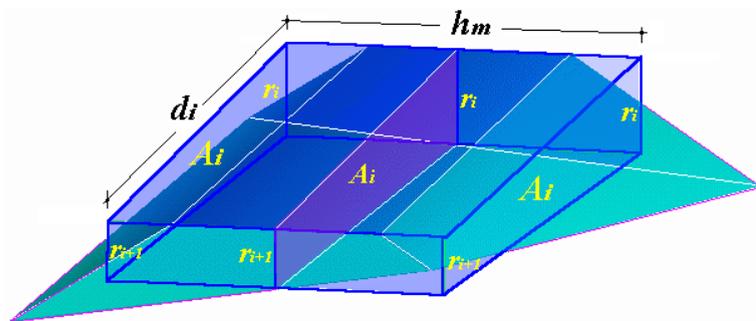


Figura 4 – Schema geometrico alternativo

$$R_m = br_m + \frac{(2r_m - p_{tm}b)^2}{8(p_s + p_{tm})} + \frac{(2r_m + p_{tm}b)^2}{8(p_s - p_{tm})}$$

e pertanto:

$$h_m = b + \frac{(2r_m - p_{tm}b)^2}{8r_m(p_s + p_{tm})} + \frac{(2r_m + p_{tm}b)^2}{8r_m(p_s - p_{tm})}$$

essendo  $p_{tm}$  la pendenza media del terreno.

Nel caso in cui le sezioni non fossero omogenee si riconduce il calcolo al caso di sezioni omogenee, suddividendo il volume in porzioni elementari di caratteristiche omogenee.

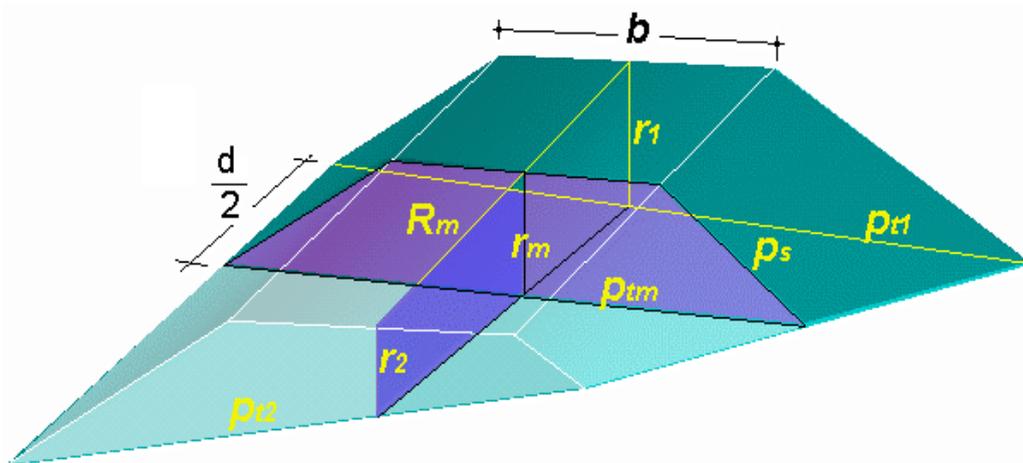


Figura 5 – Individuazione della sezione media

## 2.2 Il calcolo dei costi

L'obiettivo finale della procedura è la minimizzazione dei costi di costruzione dei rilevati e degli scavi, piuttosto che la minimizzazione dei volumi, solitamente perseguita nei metodi tradizionali. Il risultato, infatti, non coincide poiché, sezione per sezione, il costo unitario di realizzazione di  $1 \text{ m}^3$  di rilevato, o di scavo, è differente, per la diversa distanza dalle cave di prestito e rifiuto e per la variabilità dei terreni attraversati.

Per l'analisi dei costi è stata studiata preliminarmente la distribuzione delle cave al fine di conoscere quale fosse, in ciascun punto dell'asse, il costo di approvvigionamento da cava o conferimento a rifiuto di  $1 \text{ m}^3$  di materiale.

Supponiamo, ora, di voler calcolare il costo di realizzazione di un rilevato compreso tra la sezione  $i$  e la sezione  $i+1$  (Figura 6).

Il costo per realizzare  $1 \text{ m}^3$  di rilevato è stato assunto in tutto il tratto pari al costo di realizzazione calcolato nella sezione  $i$ . Pertanto il costo complessivo per realizzare il rilevato tra le due sezioni sarà

$$C_{R,i,i+1} = C_{R,i} \cdot V_{i,i+1}$$

Se il tratto fosse in scavo il procedimento di calcolo sarebbe identico, salvo sostituire il costo di approvvigionamento e messa in opera con il costo di scavo e conferimento:

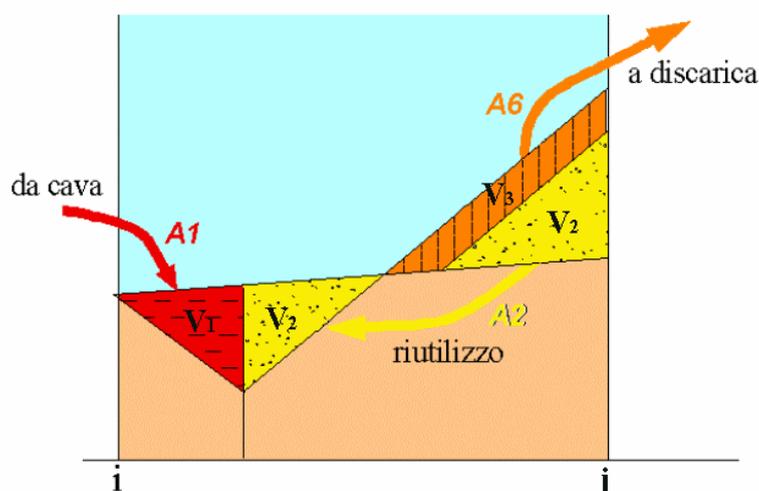
$$C_{S,i,i+1} = C_{S,i} \cdot V_{i,i+1}$$

$C_{si}$  e  $C_{ri}$  rappresentano i costi unitari di rilevato e scavo mentre  $V_{i, i+1}$  il volume da realizzare. Se il tratto fosse parte in scavo e parte in rilevato il problema verrebbe suddiviso in due sottoproblemi riconducibili ai casi precedenti.

Il costo di realizzazione di scavi e rilevati di un ampio tratto di strada compreso tra la sezione **1** e la sezione **n** sarà:

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_{Si,i+1} + \sum_{i=1}^n C_{Ri,i+1}$$

Il calcolo dei costi è stato eseguito, in un primo momento, ipotizzando che i terreni attraversati fossero tutti di pessima qualità e, pertanto portati a rifiuto. In questo caso, non essendo possibile riutilizzare gli scavi per realizzare i rilevati, sarà necessario ricorrere a cave esterne sia per l'approvvigionamento che per la messa a discarica.



**Figura 6 – Approvvigionamento, riutilizzo e rifiuto di materia all'interno di un cantiere**

Il passo successivo è quello di considerare la natura dei terreni attraversati e prevedere, laddove sia possibile, un riutilizzo dello scavo. La Figura 6 mostra lo schema di adottato. Nel tratto compreso tra la sezione **i** e la sezione **j**, nel caso più generale, si avrà una parte di scavo e una di rilevato, parte del materiale scavato potrà essere idoneo mentre la restante quota dovrà essere portata a discarica.

Nella Figura 6 si è ipotizzato l'approvvigionamento di materiale di buona qualità  $A_1$  per la realizzazione del rilevato ( $V_1$ ), che lo scavo sia costituito nella parte superficiale da materiali scadenti, es.  $A_6$ , di volume  $V_3$ , e che inferiormente sia presente un materiale  $A_2$  di scavo riutilizzabile per il rilevato ( $V_2$ ).

Il volume  $V_3$  non è idoneo e, pertanto, ad esso sarà associato un costo unitario di conferimento pari a  $C_{S,i,i+1}$ . Il volume  $V_1$  è quello che occorre acquisire da una cava di prestito, in quanto il volume  $V_2$  non è sufficiente per realizzare l'intero rilevato. Ad essa sarà associato un costo di approvvigionamento e messa in opera pari a  $C_{R,i,i+1}$ .

Infine, il volume  $V_2$  è quella parte dello scavo idonea alla realizzazione dei rilevati, pertanto sarà riutilizzata. Dal punto di vista operativo risulta utile considerare la possibilità di riutilizzare parte degli scavi come un beneficio rispetto al caso in cui tutti gli scavi vengano portati a rifiuto e tutti i volumi di rilevato realizzati con materiali acquisiti da cave di prestito.

Un esempio potrà chiarire il modo con cui si è operato. Si supponga che all'interno del cantiere si abbiano  $90.000 \text{ m}^3$  di rilevato e  $70.000 \text{ m}^3$  di scavo, del quale  $40.000 \text{ m}^3$

siano idonei per realizzare rilevati. La quantità di rilevati da eseguirsi con materiali esterni al cantiere sarà di  $90.000 \text{ m}^3 - 40.000 \text{ m}^3 = 50.000 \text{ m}^3$ .

	volumi	costo unitario	totale
rilevati	$(90.000 - 40.000) = 50.000$	5 €	250.000 €
scavo non idoneo	30.000	4 €	120.000 €
scavo idoneo	40.000	2.5 €	100.000 €
		totale	470.000 €

Se tutto lo scavo fosse conferito a rifiuto il costo complessivo sarebbe di  $90.000 \cdot 5 + 70.000 \cdot 4 = 730.000 \text{ €}$  con un beneficio di  $260.000 \text{ €}$ . Il beneficio unitario vale  $260.000 \text{ €} / 40.000 \text{ m}^3 = 6.5 \text{ €/m}^3$ . Questo può essere ripartito in  $1.5 \text{ €/m}^3$  per il minor scavo da trasportare a rifiuto e in  $5 \text{ €/m}^3$  per la riduzione del volume di rilevato.

In generale detto  $C_{bi}$  il beneficio unitario ottenibile tra la sezione  $i$  e  $i+1$  il beneficio complessivo di riutilizzo degli scavi è pari a:  $C_{riuso_i} = A_i \cdot h_{mi} \cdot C_{bi}$  dove  $h_{mi}$  è la larghezza media della sezione e  $A_i$  l'area longitudinale.

Il riutilizzo dello scavo è sempre vantaggioso dal punto di vista economico, pertanto si può considerare come un valore da detrarre a quello che si sarebbe avuto se non si fosse riutilizzato lo scavo:

$$C_{tot.con riuso_{i,i+1}} = C_{R_{i,i+1}} + C_{S_{i,i+1}} - C_{riuso_i}$$

Il costo di realizzazione di scavi e rilevati di un ampio tratto di strada compreso tra la sezione **1** e la sezione **n** sarà:

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_{tot.con riuso_{i,i+1}}$$

### 2.3. Il programma di calcolo

Il procedimento di calcolo descritto è stato automatizzato mediante un codice di calcolo sviluppato in linguaggio Visual Basic<sup>®</sup> che ha permesso di svolgere con notevole agilità la grande mole di calcoli necessari per i computi dei volumi e dei costi.

I dati di ingresso sono: le progressive delle sezioni, le quote del terreno, le pendenze trasversali, la quota della livelletta nella sezione iniziale, i costi unitari per l'approvvigionamento di materiale idoneo o per la messa a discarica di quelli in esubero. Quest'ultimi sono valutati una volta nota la distanza minima delle cave da ciascuna sezione. Ulteriore dato è rappresentato dalla quantità di scavo riutilizzabile per i rilevati. Per la sua stima è necessario conoscere la natura dei materiali in situ e la stratigrafia di terreni.

Il dati finali in uscita dal codice di calcolo sono i costi complessivi ottenibili per la livelletta di compenso geometrico (nell'ipotesi che tutte le aree longitudinali di scavo compensino quelle longitudinali di rilevato) e per una serie di ulteriori livellette nell'intorno di essa al fine di individuare quella di minor costo.

Per ciascuna livelletta il codice procede al calcolo delle aree longitudinali di scavo e di riporto a seconda che ci si trovi in uno dei quattro differenti casi descritti in Figura 2. Per ciascuna condizione viene calcolata la larghezza media tra due sezioni successive e quindi si determinano i volumi. A questi si applicano i costi unitari nell'ipotesi che tutto il rilevato derivi da cava di prestito e lo scavo venga conferito a discarica. Si perviene così al costo complessivo. Occorre a questo punto sottrarre il beneficio ottenibile dal

riuso anche parziale dei materiali scavati. Se i terreni attraversati risultano di scarsa qualità (A2-6, A2-7, A4, A5, A6, A7) il calcolo dei costi viene eseguito senza prevedere il riutilizzo. Viceversa se i terreni risultano di buona qualità (A1, A3, A2-4, A2-5), il costo viene computato, come illustrato precedentemente, sottraendo al costo totale il beneficio derivante dal riuso dei materiali all'interno del cantiere. Si otterranno così due costi, il primo nel caso in cui le terre vengano riutilizzate, il secondo nel caso questo non accada.

Nel codice sviluppato tale procedimento viene ripetuto automaticamente per ulteriori 20 volte, facendo variare di volta in volta la quota finale della livelletta di metro in metro, al fine di verificare come variano i costi discostandosi dalla soluzione di compenso. Si otterranno così i costi relativi a 21 livellette, una di compenso, 10 con quota finale maggiore della quota finale della livelletta di compenso e 10 con quota finale minore di questa.

### 3. Esempio applicativo sulla S.S. n°131

La procedura proposta assume una valenza ancora maggiore nelle aree ad elevato pregio ambientale. Oltre alle recenti norme di che impongono la procedura V.I.A., in zone ad alta sensibilità territoriale è opportuno che la progettazione non si limiti alle sole considerazioni di natura tecnica ma deve inserirsi in un contesto più ampio che quantifichi e minimizzi l'impatto che l'opera avrà sull'ambiente. In questo senso è importante l'ottimizzazione dei movimenti di materia all'interno di un cantiere stradale, in relazione alla natura dei terreni attraversati e ai costi per l'approvvigionamento dei materiali necessari alla costruzione dei rilevati e per il conferimento di quelli in esubero.

L'esempio applicativo è stato sviluppato con riferimento ai lavori di adeguamento della S.S. n°131 che rappresenta l'asse fondamentale della regione Sardegna. In questa regione il tema riveste particolare interesse poiché, accanto ad una intensa attività estrattiva e ad un contesto ambientale altamente sensibile, sono in corso di attuazione o programmati importanti interventi sulle infrastrutture stradali. Alcuni numeri possono dare la dimensione assunta dal problema nella regione Sardegna. Qui sono state censite 2372 cave di cui 504 attive e 1868 inattive: allo stato attuale si stima che gli sfridi e i residui di lavorazione sinora prodotti ammontino a circa 200.000.000 m<sup>3</sup> nelle sole cave ornamentali.

Nell'analisi che segue le cave attive sono state utilizzate per il reperimento dei materiali necessari alla realizzazione di rilevati, mentre per quelle inattive sono state impiegate come cave di rifiuto per la messa a dimora dei materiali non idonei provenienti dagli scavi. In prospettiva un considerevole numero di cave inattive potrà essere utilizzato per il reperimento di materiale idoneo alla costruzione di rilevati sfruttando gli imponenti cumuli in esse presenti.



Figura 7 – Tratta della S.S. n°131 esaminata

### 3.1 L'analisi dei costi in funzione della dislocazione delle cave

Lo studio della dislocazione delle cave, del loro stato di attività, della loro produttività e destinazione d'uso è stato condotto sulla base dei dati relativi ai censimenti effettuati per conto del "Catasto Regionale dei Giacimenti di Cava", aggiornato al luglio 2001. Sono state prese in considerazione solo le cave con produttività maggiore di 10.000 m<sup>3</sup>/anno e, tra quelle inattive, solo quelle con un'estensione maggiore di 5000 m<sup>2</sup>.

Una procedura automatica di calcolo ha permesso di calcolare la distanza di ciascun punto dell'asse stradale dalle cave selezionate, evidenziando quella minima e valutandone il costo unitario di messa in opera e trasporto (Figura 8).

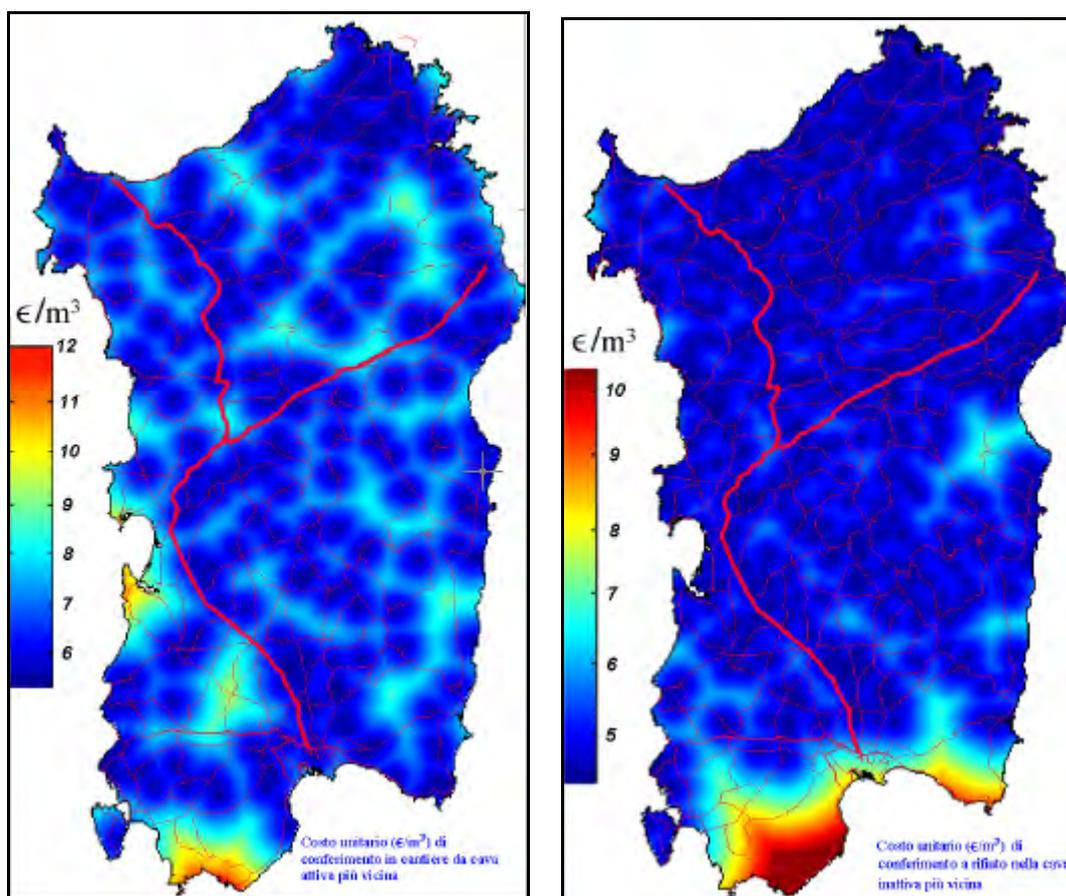


Figura 8 – Costi unitari di approvvigionamento e scarica in funzione della distanza

La stima del costo si è basata sulla relazione:

$$C = C_{R,i} \cdot V_i \cdot D_i + C_R V_i$$

con

$C_R$  = costo unitario di 1 m<sup>3</sup> in cava e sua messa in opera, indipendente dalla distanza;

$C_{R,i}$  = costo unitario del trasporto di 1 m<sup>3</sup> di rilevato;

$D_i$  = distanza tra la cava e la sezione di messa in opera del materiale;

$V_i$  = volume di rilevato da realizzare tra la sezione  $i$  e  $i+1$ .

I valori di  $C_R$  e di  $C_{R,i}$ , determinati sulla base del "Prezziario Regionale Opere Pubbliche della Regione Sardegna" e da riscontri sui costi di mercato, sono stati assunti

essere di  $3.9 \text{ €/m}^3$  e  $0.14 \text{ €/m}^3 \text{ km}$ . Analoga relazione è stata adottata per ricavare i costi dei volumi di sterro da conferire a discarica. Sono stati adottati per  $C_S$  e  $C_{Si}$  i valori di  $3.1 \text{ €/m}^3$  e  $0.14 \text{ €/m}^3 \text{ km}$ . I risultati sono illustrati nelle seguenti Figure 9-14.



Figura 9 – Profilo altimetrico



Figura 10 – Costi unitari di trasporto

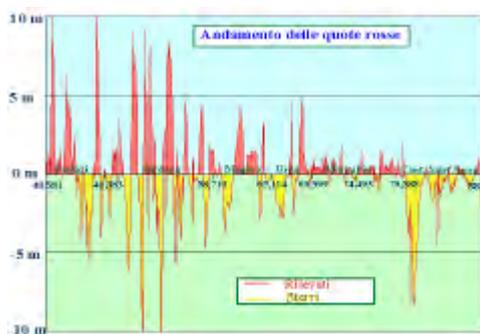


Figura 11 –Quote rosse

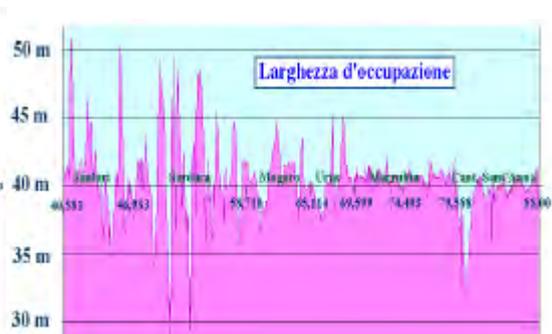


Figura 12 – Larghezza di occupazione

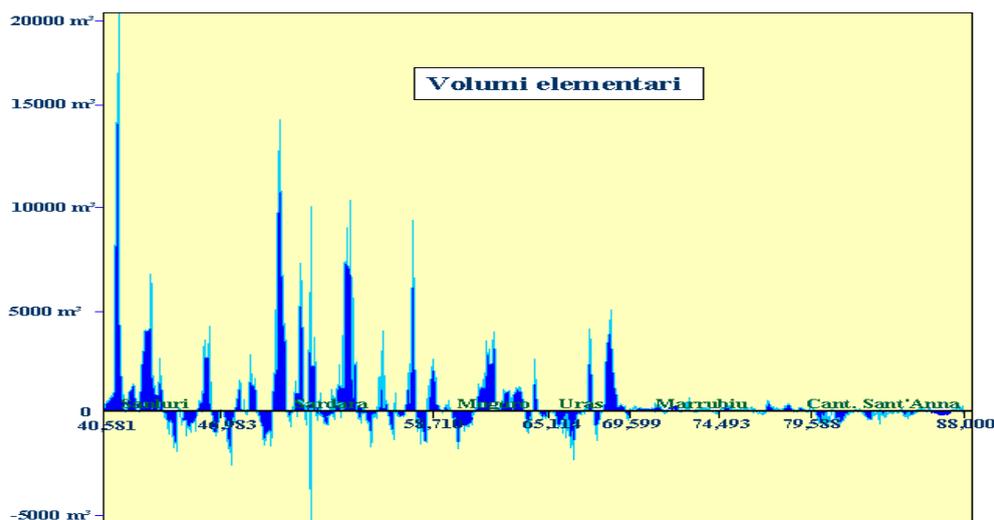


Figura 13 – Volumi elementari

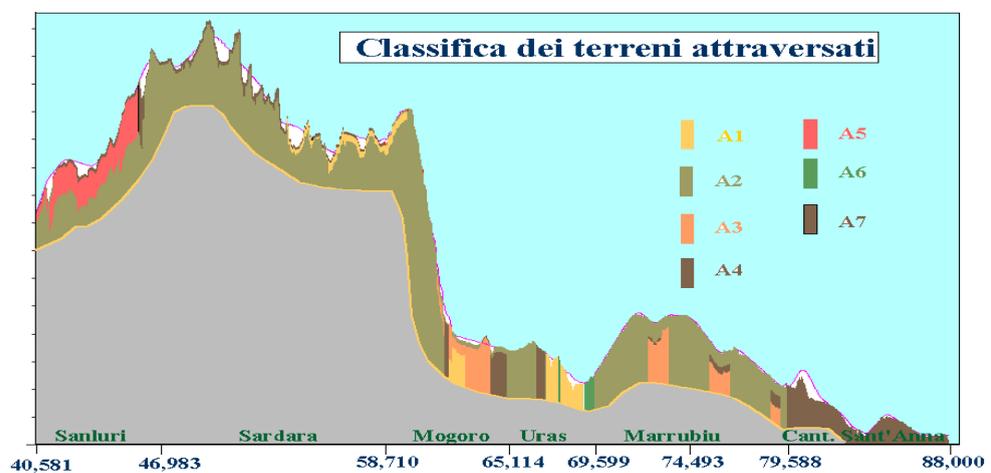


Figura 14 – Classifica HRB dei terreni

La disponibilità dei rilievi geotecnici e dei sondaggi ha permesso di ricostruire il profilo stratigrafico dei terreni e la relativa classifica HRB (Figura 14). Nei lotti relativi ai comuni di Sanluri e Sardara, sono presenti terreni con uno stato superficiale di scarsa qualità (tipo A7), che va da una profondità minima di 0.90 m ad una massima di oltre 10 m. Al di sotto di tale strato la qualità del terreno migliora (terreni di tipo A2 e A3). Il tratto in comune di Mogoro è caratterizzato da terreni di buona qualità, se si escludono alcuni banchi di terre di tipo A7 e A6. Dal Km 69.5 al Km 79.5 il terreno è di tipo A2, mentre dal Km 79.5 al km 88 risulta di tipo A4, di mediocre qualità.

### 3.2 Risultati

Inizialmente la procedura illustrata è stata applicata ad alcuni tratti della S.S. n°131, della lunghezza di circa 1 Km, che si differenziano per la natura dei terreni che attraversano e per la distanza dalle cave di prestito e di rifiuto.

A titolo esemplificativo si riportano i risultati nel tratto dal km 52,662 al km 53,620. Il terreno è costituito da un primo strato, profondo circa 90 cm, di materiale di tipo A7, che essendo di pessima qualità andrà rimosso, e da uno strato sottostante di materiale di tipo A2, idoneo per la formazione di rilevati. Il codice di calcolo sviluppato ha elaborato i dati e prodotto i risultati riassunti nelle Figure 15 - 16.

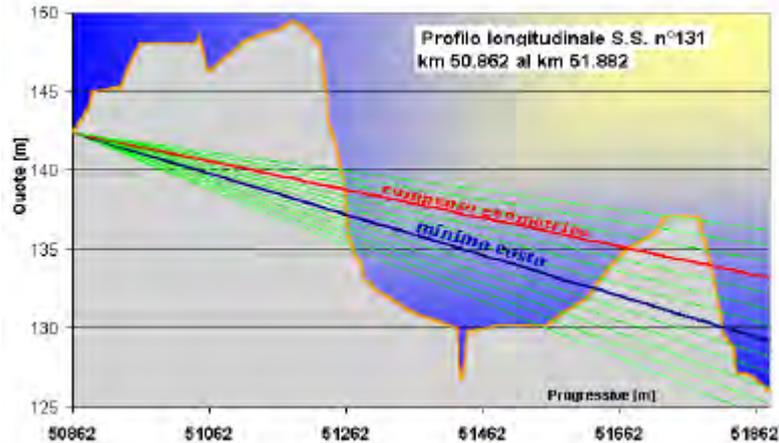


Figure 15 Insieme delle livellette considerato nello studio parametrico dei costi

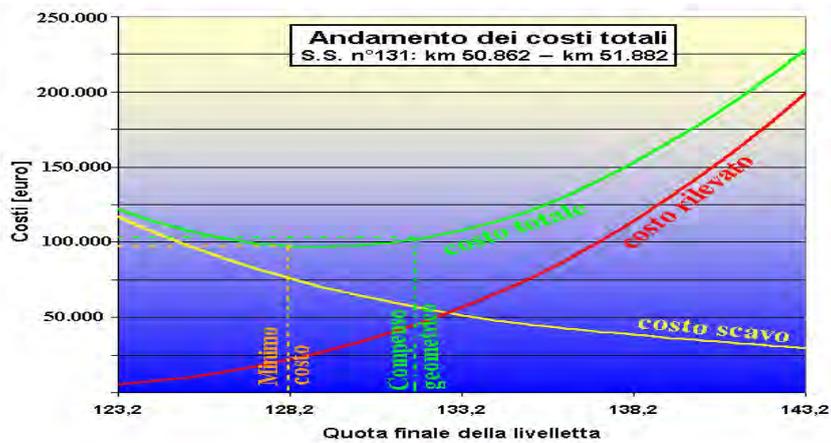


Figure 16 - Studio parametrico dei costi tratta km 50.862 al km 51.882

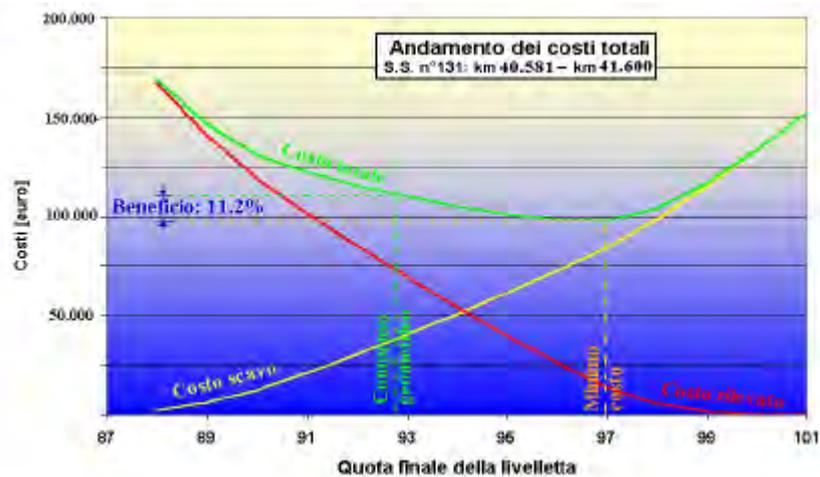


Figure 17 - Studio parametrico dei costi tratta km 40.581 al km 41.600

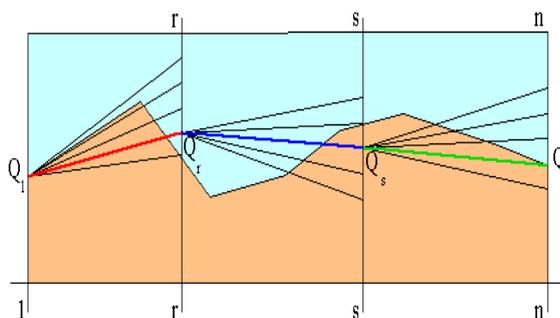
Nella Figura 16 si può osservare il vantaggio economico nel realizzare la livelleta di minor costo. Nel caso specifico tale vantaggio è abbastanza limitato poiché quasi tutto il volume di scavo può essere impiegato per costituire rilevato.

Maggiori benefici si hanno quando i terreni di fondazione sono scadenti. La Figura 17 illustra questo secondo caso, relativo alla tratta compresa tra il Km 40,581 e il Km

41,600. I terreni attraversati risultano di scarsa qualità. Per i primi 700 m. circa lo strato superiore, per una profondità di 2,70 m. è costituito da terreni di tipo A5 e A7. Oltre tale stato è più profondo, con uno spessore maggiore di 10 m. Al di sotto si trova del terreno di tipo A2 idoneo alla formazione dei rilevati. In questo caso il costo della livelletta individuata dal codice di calcolo è inferiore del 11.2% rispetto a quello della livelletta di compenso geometrico. L'analisi è stata ripetuta in numerose altre tratte della S.S. n°131 pervenendo, laddove sono presenti materiali inadatti a profondità maggiori di 10-12 m, a minori costi in qualche caso maggiori del 16%.

Le livellette individuate applicando il metodo si trovano per quasi tutto il tratto al di sotto di quelle di progetto e, pertanto, la soluzione proposta realizza più scavi di quella di progetto. Una diretta conseguenza è anche quella di limitare il reperimento dei materiali per i rilevati da cave esterne, bonificando eventualmente i numerosi siti inattivi con il materiale inadatto scavato in esubero. Mediando il risultato alla serie di tratte analizzate si è ottenuto un minor costo di circa 60.000 €/km pari al 14% del costo chilometrico medio dell'opera.

Il metodo può essere agevolmente esteso anche a tratti stradali con più raccordi altimetrici ricercando la successione di livellette che minimizza i costi, procedendo in modo iterativo. Supponiamo di voler posizionare una serie di livellette dalla sezione **1** alla sezione **n** (Figura 18). Si supponga che la quota iniziale  $Q_1$  della livelletta nella sezione **1** sia vincolata per la necessità di raccordare il tratto in questione con quello che lo precede, e che per esigenze di coordinamento piano-altimetrico il punto finale della prima livelletta debba ricadere sulla retta **r-r**, il punto finale della seconda sulla retta **s-s**, e il punto finale della terza sulla retta **n-n**. Si procede applicando il metodo



**Figura 18 – Studio esteso a più livellette**

esposto al primo tratto, dalla sezione **1** alla sezione **r**, ricavando la livelletta più conveniente, evidenziata in rosso, la cui quota finale è  $Q_r$ . Si passa poi al secondo tratto **r-s**, imponendo quale quota iniziale quella di  $Q_r$ , ricavando quella finale  $Q_s$  che individua la soluzione di minor costo evidenziata in blu. Infine, nell'ultimo tratto **s-n** si assumerà come valore iniziale la quota  $Q_s$ , determinando la livelletta economicamente più vantaggiosa, in verde, la cui quota finale è  $Q_n$ . Le tre livellette così individuate dovranno poi essere completate mediante raccordi verticali.

#### 4. Conclusioni

L'obiettivo della memoria, è quello di mettere a punto un metodo per la determinazione della posizione delle livellette stradali che tenesse conto della distribuzione delle cave di prestito e di rifiuto e della natura dei terreni attraversati. Questi aspetti, non sempre tenuti in debito conto nella progettazione tradizionale, influiscono notevolmente sui costi di realizzazione delle opere stradali e sull'impatto ambientale da esse prodotto.

La ricerca ha condotto ad una metodologia di analisi, resa operativa mediante un software di calcolo, la quale, in funzione delle caratteristiche del terreno e dei costi di approvvigionamento e messa a discarica, permette di stimare i costi di realizzazione di diverse livellette evidenziando quella di minor costo.

Il metodo elaborato è stato applicato a tratti della S.S. n°131. Su questa è stato stimato che il benefico è variabile in funzione della natura dei terreni di fondazione.

Laddove è possibile il riutilizzo degli scavi, il costo della livelletta di compenso geometrico è solo di poco superiore (3-4%) rispetto a quello conseguibile con la metodologia proposta. Quando i terreni attraversati risultano scadenti (A<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>) la livelletta di compenso geometrico risulta decisamente più onerosa. Il vantaggio risulta in qualche caso maggiore del 16%. Sulla l'intera tratta della S.S. n°131 l'applicazione del metodo proposto ha permesso un risparmio medio del 14%. Risulta comunque decisiva la distribuzione delle cave di prestito e di rifiuto nel determinare entità del benefico.

Ulteriori vantaggi di carattere ambientale sono quelli di poter disporre di materiali per sistemare e rimodellare le numerose cave dimesse che insistono nella zona considerata e di realizzare minori quantità di rilevati. Infatti, il reperimento della terra da cave di prestito esterne al cantiere estende l'impatto ambientale oltre la sede stradale.

Ulteriore sviluppo della ricerca è quello di estendere l'analisi al tracciato planimetrico e di stimare i benefici ambientali derivanti dalla riduzione delle cave di prestito e dal recupero delle cave dismesse.

Il risultato atteso è quello di una conferma delle conclusioni esposte e l'aumento dei benefici complessivi stimati.

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano i tecnici e i responsabili dell'A.N.A.S. e della Progemisa S.P.A. per la collaborazione e la disponibilità offerta nel fornire informazioni indispensabili alla stesura della memoria.

### **Bibliografia**

- [1] G. Tesoriere, *“Strade, Ferrovie e Aeroporti. Il progetto e le opere d'arte.”*, 5<sup>a</sup> ed. UTET, febbraio 1990.
- [2] P. Ferrari, F. Giannini, *“Geometria e Progetto di Strade”*, ed. ISEDI, 1987.
- [3] F. Serafini, *“Manuale di Progettazione e Costruzione delle Strade”*, ed. GEOGRAPH, settembre 1993.
- [4] CalTran, California State Department of Transportation, *“Highway Design Manual (HDM)”*, electronic version <http://www.dot.ca.gov/hq/oppd/hdm/hdmtoc.htm#toc..>, June 2001.
- [5] WSDOT Washington Dep.of Transp. *“Road Design Manual”*, AASHTO guidelines ev <http://www.wsdot.wa.gov/fasc/engineeringpublications/designmanual.htm>, April 1998
- [6] AASHTO *“A Policy on Geometric Design of Highways and Streets”*, 1994
- [7] VDOT, Virginia Dep.of Transp *“Road Design Manual, Volume 2 (Metric)”*, August 1994,
- [8] AASHTOware® IGrds® *“Road Design Manual”*, fall edition, 1999
- [9] D.B.Fambro, J.C.Collings, R. Della Vedova, J.P. Leisch, J.M. Mason *“Geometric Design: Past, Present and Future”*, Transportation Research Board – National Research Council, Washington, D.C., January 2000.
- [10] Kevin G. Sutterer *“Transportation Earthworks”*, Transportation Research Board – National Research Council, Washington, D.C., January 2000.