

CARTOGRAFIA E GRANDI INFRASTRUTTURE

di Alberto Cina

2^a parte

I moderni mezzi di misura e di calcolo permettono di tracciare sul terreno, con elevate precisioni, grandi e complesse infrastrutture: ciò è determinante per la buona riuscita di un'opera. La sola precisione strumentale non è però da sola garante della bontà delle operazioni di rilevamento e di tracciamento in quanto, anche le misure più "s sofisticate" possono portare a risultati scadenti o inaffidabili in presenza di cattive configurazioni degli schemi geometrici adottati per le misure. È quindi sempre importante una preliminare pianificazione e progettazione delle operazioni di misura per ottimizzare i costi, le precisioni e l'affidabilità delle operazioni topografiche.

In questa seconda parte dell'articolo saranno quindi affrontati i temi legati alle questioni geodetiche e topografiche, di cui bisognerà tenere conto nella progettazione e realizzazione sul terreno delle grandi infrastrutture.

PROBLEMI GEODETICI E CARTOGRAFICI

Ogni infrastruttura nasce da un'idea progettuale: essa si sviluppa su una cartografia dalla quale il progettista può dedurre le "condizioni al contorno" che la realizzazione tecnica dell'opera e il suo impatto con il territorio e con l'ambiente comporta. Se per una definizione di massima del tracciato si può lavorare sulla cartografia a piccola e media scala esistente (1:25.000 IGM o 1:10.000 della CTR), una progettazione esecutiva prevede una cartografia a grande scala, spesso realizzata appositamente per via fotogrammetrica e con rilievi topografici in prossimità di manufatti notevoli (imbocchi di gallerie, ponti, viadotti e altro). Nella realizzazione di un'opera esiste un delicato momento nel quale occorre trasferire la geometria del progetto, appartenente ad un mondo virtuale privo di errori metrici, al mondo reale del terreno. Al topografo è affidata questa

importante operazione che prende il nome di "tracciamento". Chi esegue il tracciamento deve rispettare le geometrie progettuali (raggi di curvatura, curve di raccordo, assi delle gallerie e altro ancora) individuate dal progettista, usando tutte le potenzialità dei moderni strumenti di misura e di calcolo oggi disponibili, per arrivare ad ottenere la precisione richiesta. Egli deve ancora essere ben conscio delle caratteristiche della cartografia utilizzata che, come abbiamo visto nella prima parte dell'articolo, rappresenta un elemento fondamentale di raccordo tra progetto e terreno.

Tutte le misure topografiche sono affette da errori (fluttuazioni) imprescindibili, legati all'operatore, allo strumento e all'ambiente circostante: essi si propagano in funzione degli schemi geometrici e dei metodi di misura, la cui bontà è spesso determinante per la precisione del tracciamento.

Tutto ciò ci riporta dunque ad una nota considerazione: al pari di ogni opera ingegneristica anche le misure topografiche è bene passino attraverso una fase di progettazione, per ottimizzare gli schemi e le operazioni di misura in funzione della precisione prevista durante il progetto. Le quattro fasi di progetto vengono in gergo definite:

- *ordine zero*: scelta del sistema di riferimento, fase di particolare interesse proprio nella realizzazione di infrastrutture;
- *primo ordine*: scelta del tipo di misure e del loro schema;
- *second'ordine*: progettazione della precisione delle misure;
- *terz'ordine*: ottimizzazione degli schemi di misura, con aggiunta e/o eliminazione di vertici o osservazioni.

Per una dettagliata ed esaustiva trattazione sull'argomento si rimanda alla letteratura, ad esempio Barbarella Crosilla (1983) o Bellone et al. (1995), limitandoci in questa sede al trattamento dei problemi del tracciamento.



FIGURA 1 Il tracciato e la rete geodetica

IL TRACCIAMENTO

Nelle operazioni di tracciamento è necessario materializzare sul terreno il sistema di riferimento precedentemente scelto. Non sempre il sistema di riferimento usato nel progetto coincide con quello del tracciamento: ciò che conta è che sia materializzato e siano note le formule di passaggio. Questa operazione si fa attraverso l'istituzione di una rete geodetica, spesso realizzata appositamente (fig.1), che "ingabbia" l'infrastruttura. I vertici di questa rete possono essere: vertici di stazione, in prossimità di particolari notevoli (imbocchi e finestre laterali delle gallerie, viadotti, ponti e altro) e vertici di orientamento per le misure angolari. Nelle loro coordinate è implicito il sistema di riferimento che sarà usato nel tracciamento dei particolari.

La rete geodetica

Può essere realizzata con misure topografiche classiche (angoli e distanze) anche se risulta più conveniente la tecnica GPS per la maggiore precisione e velocità operativa, specialmente se l'opera insiste su vaste zone di territorio. In tutti i casi la rete geodetica viene compensata con l'algoritmo dei minimi quadrati. Per semplicità poniamo che tra le coordinate x e le misure L sussista il seguente modello lineare:

$$Ax-L=v$$

con A matrice disegno contenente i coefficienti delle equazioni di osservazioni, L il vettore delle osservazioni, x quello delle incognite e v quello degli scarti. La stima avviene secondo la nota formula:

$$x=(A^T P A)^{-1} A^T P L = N^{-1} T_n$$

con P matrice dei pesi, N matrice normale. La precisione dei vertici della rete si deduce dalla matrice di varianza covarianza C_{xx} stimata dopo la compensazione secondo la:

$$C_{xx} = \sigma_0^2 N^{-1}$$

con $\sigma_0^2 = v^T P v / \text{ridondanza}$ = varianza dell'unità di peso. Anche la matrice C_{xx} può essere progettata a meno di σ_0^2 che sarà oggetto di stima una volta eseguite realmente le misure. In sede di progettazione delle misure è definibile un'altra importante matrice R , detta di "ridondanza", calcolabile con la:

$$R = (I - A N^{-1} A^T P)$$

(con I = matrice identità)

Essa contiene sulla diagonale principale i termini, compresi tra 0 e 1, detti "ridondanze locali" ovvero il contributo di ogni osservazione alla ridondanza complessiva della rete. Da questa è derivabile la matrice di varianza covarianza degli scarti C_{vv} , anch'essa progettabile prima di aver eseguito le misure, ipotizzando un valore a priori della varianza dell'unità di peso:

$$C_{vv} = \sigma_0^2 P^{-1} R$$

È buona norma eseguire test di verifica delle osservazioni per rilevare la presenza di errori grossolani. Una delle tecniche utilizzabili è quella del residuo normalizzato, che sottopone a test lo scarto v normalizzato rispetto al suo residuo σ_v , che si trova sulla diagonale principale della C_{vv} :

$$w = |v|/\sigma_v \leq k_\alpha$$

Esso deve risultare minore di un "intervallo di confidenza" k_α , definito dal "livello di significatività" α , che indica la probabilità di rigettare una misura corretta.

Le tecniche di tracciamento

Il tracciamento sul terreno delle grandezze geometriche definite nel progetto è usualmente fatto con le tecniche topografiche classiche (teodolite e distanziometro). Anche se il GPS è diventato ormai competitivo con le stazioni totali, la sua applicazione dipende dalla percentuale di punti direttamente tracciabili senza temere ostacoli di visibilità della costellazione GPS.

Il tracciamento GPS è particolarmente conveniente se si usano tecniche differenziali in tempo reale (fig.2) (Cina, 2000), che se applicate alle misure di fase (tecnica RTK) portano, per brevi distanze dal ricevitore base (alcuni km), ad una precisione centimetrica. In questo caso si può operare direttamente "per coordinate" nel sistema di riferimento definito. Lavorare con ricevitori GPS implica necessariamente usare il sistema WGS84. È possibile comunque eseguire una trasformazione tra sistema WGS84 e il sistema del tracciamento anche in tempo reale, sfruttando le funzioni generalmente implementabili sul *controller* del GPS (computer di governo in alcuni casi programmabile dall'utente). Come è comprensibile, in galleria è invece necessario ricorrere alla strumentazione topografica classica (stazione totale). Note dalla compensazione della rete geodetica le coordinate cartesiane dei vertici (fig.3) di stazione (*S*) e di orientamento (*O*), un punto generico *i* definito nel progetto, può essere tracciato sul terreno, con una stazione totale, per coordinate polari. Occorre riportare sul terreno dal punto di stazione la direzione α dal vertice d'orientamento e distanza *d*, entrambe ricavabili dalle coordinate cartesiane secondo le semplici relazioni di figura 3. L'apparente semplicità teorica di quest'operazione nasconde però un primo problema: il sistema di riferimento nel quale è sviluppato il progetto deve

FIGURA 3 Tracciamento con misure classiche

$$d = \sqrt{(x_i - x_S)^2 + (y_i - y_S)^2}$$

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{x_i - x_S}{y_i - y_S} - \operatorname{atan} \frac{x_O - x_S}{y_O - y_S}$$

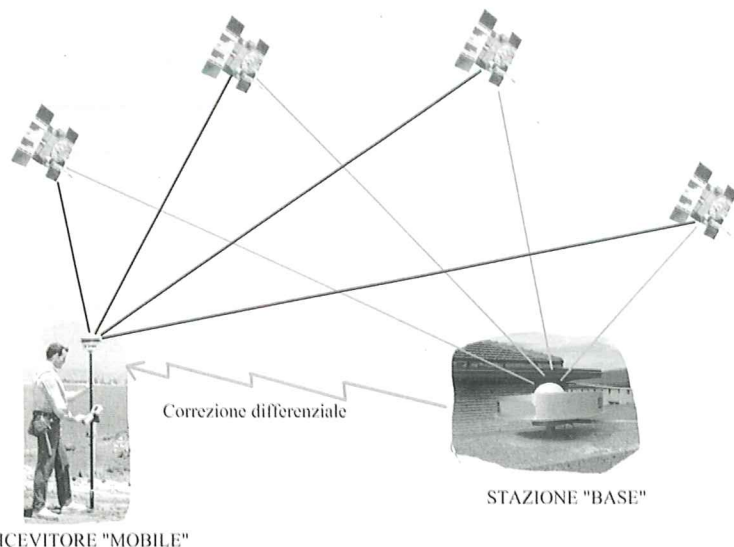
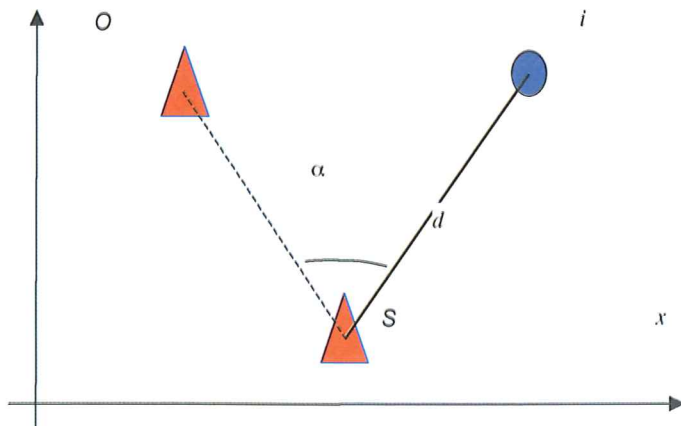


FIGURA 2 Misure GPS differenziali in tempo reale

coincidere con quello "strumentale" di tracciamento. Come si vedrà al successivo paragrafo, questo non è mai rigorosamente vero, specie se si utilizza il sistema cartografico nazionale.

Nel tracciamento di lunghe gallerie può essere usato il giroscopio che fornisce direttamente un azimut astronomico, con precisione di circa ± 0.8 mgon. Essa è inferiore a quella delle misure angolari di precisione ma è costante su qualunque lato di una poligonale di tracciamento. Si elimina così la propagazione dell'errore angolare tipico delle poligonali. Il giroscopio diventa competitivo con le misure di angoli eseguite con normali teodoliti dopo un numero *n* di lati. Sia $\pm \sigma_\alpha$ la precisione della misura angolare e $\pm \sigma_g$ quella dell'azimut del giroscopio: propagando la varianza dell'angolo, dopo *n* lati essa diventa equivalente o superiore a quella dell'azimut del giroscopio: ($n\sigma_\alpha^2 \geq \sigma_g^2$). Esso è dunque conveniente per poligonali con lati in numero superiore a $n \geq \sigma_g^2 / \sigma_\alpha^2$. In pratica è sempre conveniente integrare misure angolari a quelle di azimut giroscopico per eseguire controlli e compensazioni delle misure.

Gli schemi classici di tracciamento

Nel tracciamento in galleria viene realizzata una poligonale d'asse con misure di distanze e direzioni angolari. Si consideri come esempio uno schema di poligonale con 5 lati della lunghezza compresa entro 1 km. Questa lunghezza costituisce in pratica un limite operativo nei tracciamenti in galleria dove spesso risulta difficoltosa la collimazione a causa dell'atmosfera quasi mai limpida. Si ipotizzino precisioni (sqm) pari a ± 0.5 mgon per le misure angolari e $\pm (3\text{mm} + 2\text{ppm})$ per quelle di distanza. In figura 4 si riporta la simulazione di tale poligonale che parte dal vertice di stazione di posizione nota (1) con orientamento noto (100) e chiusa angularmente su un vertice finale (800). Le ellissi d'errore sono al 95% di probabilità (2.47 volte l'ellisse standard). L'analogia statica della poligonale vincolata agli estremi è quella di una mensola iperstatica, appoggiata all'estremità, la cui freccia *f* è calcolabile con la relazione riportata in figura 4.

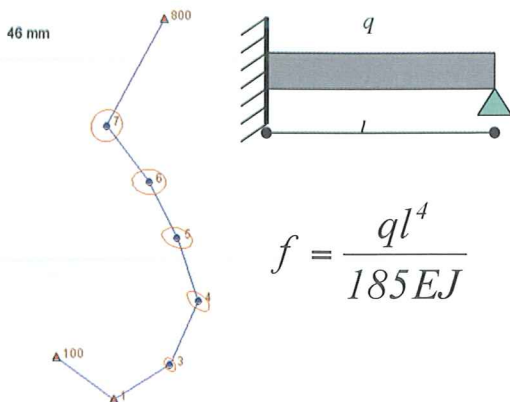


FIGURA 4 Poligonale d'asse chiusa angolarmente e analogia statica

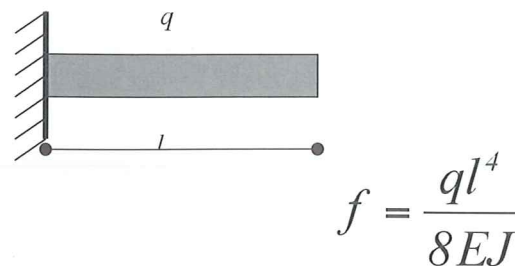


FIGURA 5 Analogia statica della poligonale d'asse aperta

Detto schema è in realtà solo teorico in quanto la chiusura angolare in galleria si potrà avere solo abbattuto l'ultimo diaframma che separa il tracciatore dal vertice di chiusura. Fino ad allora lo schema è più simile a quello di una mensola isostatica, struttura come noto molto più deformabile (fig. 5). La sola mancanza della chiusura angolare porta ad un'ellisse d'errore con semiassie pari a quasi 4 volte quello della corrispondente poligonale vincolata (fig. 6a).

Per capire come la geometria dello schema condiziona la precisione finale, ipotizziamo il caso (fig. 6b) di un vertice d'orientamento posto a soli 150 m dal vertice di stazione. Ragionevoli e ineliminabili errori di puntamento al segnale e centramento della stazione provocano corrispondenti errori angolari, tanto maggiori quanto minore è la lunghezza del lato d'orientamento.

Il problema è analogo a quello "dell'efficienza" dell'incastro nella mensola. La propagazione della varianza porta in questo caso ad un peggioramento della precisione, rispetto al caso con vertice d'orientamento a 1 km, di circa il 30%, in termini di ellissi d'errore. L'incertezza maggiore si ha sempre nella direzione trasversale all'asse della galleria con conseguenti probabili problemi di "riattacco" dei due fronti di scavo.

Analogia simulazione porta ancora a considerare che, nel caso

esaminato, distanze d'orientamento superiori a 1 km non migliorano la precisione globale. Esse, per contro, possono risultare problematiche da un punto di vista operativo in caso di scarsa visibilità.

Questi problemi sono ben noti a chi opera nel campo della topografia e del tracciamento, oltre a tutte le regole del ben operare: ad esempio è noto che visuali con forti elevazioni amplificano gli errori residui di rettifica delle misure angolari. Generalmente il topografo cerca di non porsi in queste condizioni.

In alcuni casi però il problema della configurazione geometrica può derivare dalla progettazione dell'opera: per gli stessi motivi prima esposti, un lato iniziale d'ingresso in galleria con visuale libera troppo breve (nel nostro esempio 150 m) provoca un decadimento di precisione che può arrivare nel nostro caso a circa 60% (fig. 6c), non imputabile certo all'incuria delle misure.

Anche lo schema della poligonale aperta è migliorabile dal momento che non essendo ridondante non permette un controllo o compensazione delle misure. Esso può diventare di precisione insufficiente in gallerie molto lunghe. Proprio in questo caso diventa utile integrare le misure angolari con quelle "indipendenti" di azimut con giroscopio.

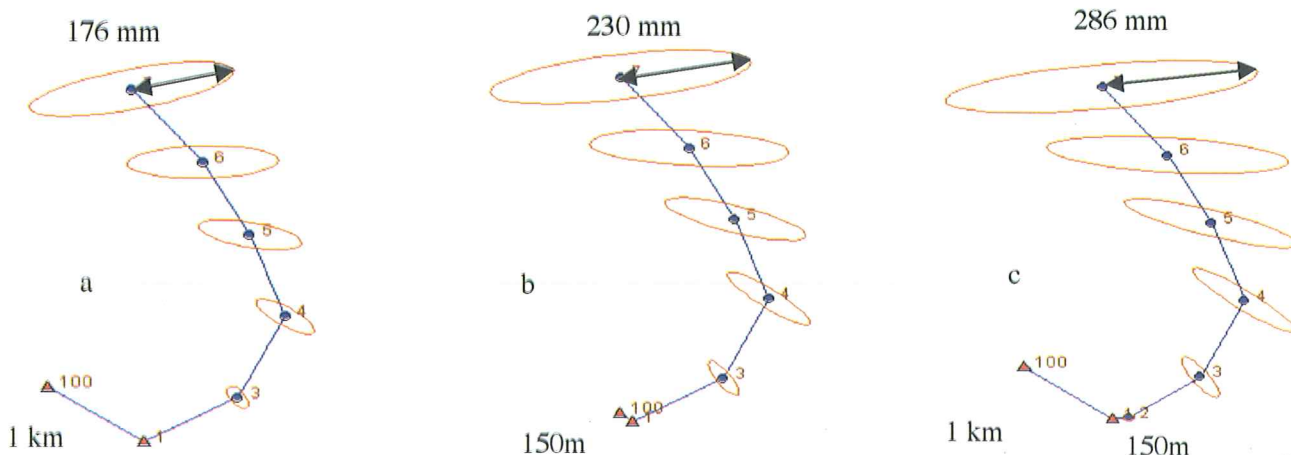


FIGURA 6 A, B, C Poligonale d'asse aperta

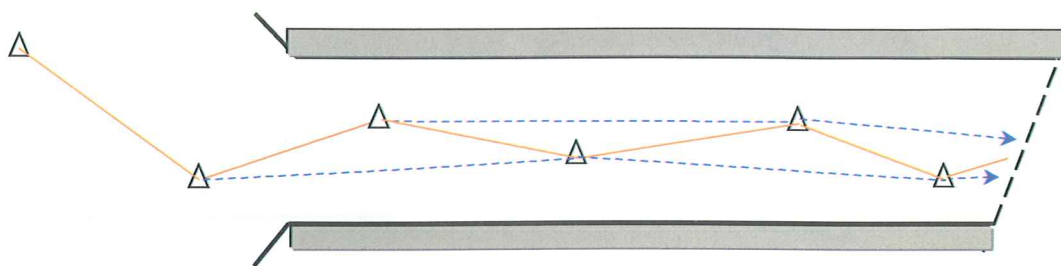


FIGURA 7 Integrazione di misure angolari (rosse) e di azimut con giroscopio (blu)

La figura 7 mostra una possibile soluzione con uno schema "a traliccio". Schemi più complessi sono certo possibili ma non sempre il maggior impegno di tempo e lavoro compensa il guadagno di precisione. Si pensi che il lavoro di tracciamento è spesso limitato nel tempo da esigenze di cantiere, dal passaggio di veicoli o problemi di sicurezza e altro ancora. La collocazione ottimale dei vertici che consente il passaggio dei veicoli e maggiori visuali libere è quella laterale, in prossimità dei paramenti della galleria. In questo caso si è però maggiormente esposti al problema della "rifrazione atmosferica laterale", dovuta alle diverse caratteristiche dell'aria vicino ai paramenti o al centro galleria. La scelta di posizionare i vertici prossimi alla mezzera limita questo problema ma il transito dei veicoli e macchine operative finiscono per danneggiarli. In uno schema a traliccio (triangoli o quadrilateri) il problema della rifrazione laterale viene in pratica mediato con compensazione.

Alberto Cina
 Politecnico di Torino - DIGET
cina@polito.it

CONCLUSIONI

In conclusione di questa nota, possiamo affermare che per la buona riuscita di un'infrastruttura è determinante la maniera con la quale si affronta il processo geodetico e cartografico: dalla definizione dei sistemi di riferimento, alla realizzazione della cartografia e dei rilevamenti fino al tracciamento dell'opera. Da questo iter dipende la precisione con cui l'opera è traspunta dal progetto al terreno.

In tutte le fasi occorre sempre esista uno stretto contatto tra il topografo e il progettista, per tenere conto nella progettazione anche delle esigenze geodetico-topografiche e di tracciamento, imprescindibili nella realizzazione di complesse opere ingegneristiche come strade, ferrovie e grandi infrastrutture in genere. ■

Bibliografia

1. Bellone T., Cina A., Manzano A., Tomatis M. (1995): «Controllo di movimento franoso in prossimità di un grande manufatto mediante l'uso di misure satellitari GPS». In: Rivista GEAM n.2-3 1995. (pagg. 93-99).
2. Barbarella, M. Crosilla, F. (1983): Ottimizzazione dei pesi e dell'affidabilità delle osservazioni di una rete di inquadramento per cartografia a grande scala. Bollettino della SIFET, n.1, pp.61-79.
3. Betti, B. Manzano, A. (1996): Linea TAV Bologna Firenze. La progettazione della rete GPS. Rivista «Le strade», 6/96.
4. Carosio, A. Reis, O. (1995): Méthodes géodésiques et modèles mathématiques pour l'implantation des nouvelles transversales alpines. In rivista «Mensuration Photogrammétrie Génie Rural» - Svizzera.
5. Cina, A. Venuti, G. (1998): Inquadramento della Bologna-Firenze con il GPS. «Le strade», 10/98.
6. Cina, A (2000). GPS. Principi, modalità e tecniche di posizionamento. Torino, Celid,
7. Cina, A. (2002): Cartografia e grandi infrastrutture - 1° parte. Rivista Geomedia, n. 2/02
- Dequal, S. (1996): Linea TAV Bologna-Firenze. Dal progetto al terreno. «Le strade», 6/96.