

Misure di azimut giroscopici di alta precisione – La tecnologia essenziale per il tracciamento di gallerie estremamente lunghe

D. SALVINI (*), A. CAROSIO (*), S. BRUGGER (*)

(*) ETH, Politecnico federale di Zurigo, IGP, Hönggerberg, 8093 Zurigo, CH

Riassunto

Nella realizzazione di tunnel di elevata lunghezza l'unico metodo efficace per garantire il rispetto della tolleranza di tracciamento (specialmente dell'errore laterale) è di migliorare la direzione e l'orientamento degli scavi con misure di azimut di alta precisione. A tale scopo si utilizza un teodolite giroscopico (precisione < 1 mgon) il cui asse di rotazione oscilla attorno al Nord astronomico in conseguenza dell'influsso combinato della rotazione del giroscopio stesso, della forza di gravità e della rotazione della terra. Per raggiungere l'alta precisione richiesta è essenziale considerare tutti i fattori che influiscono sulla misura, sia nella fase di acquisizione, come per esempio la temperatura, che in quella di elaborazione dei dati, dove per esempio la qualità del modello del geoide utilizzato è determinante. I primi risultati ottenuti nella galleria di base del San Gottardo si possono considerare eccellenti. Essi convalidano i modelli e le metodologie applicate anche nella misurazione della galleria di base del Lötschberg (perforazione finale avvenuta nell'aprile 2005). La prima perforazione parziale nel traforo di base del San Gottardo, dopo circa 19 chilometri di galleria, ha portato ad avere un errore laterale è di appena 92 mm. Ciò è da considerarsi un grande successo per l'ingegneria geodetica.

Abstract

When tracing extreme long tunnels, the only way to keep errors (especially the horizontal deviation) in an acceptable range, is to improve the directional reference with high accuracy azimuths measurements. These are measured using a precision-surveying gyroscope (accuracy < 1 mgon), which axis oscillates around the astronomic north as a result of the interaction of the gyro rotation, the gravitational pull and the Earth's rotation. To reach the high accuracy needed, it is essential to consider all relevant interfering effects during both, the data acquisition and the data processing phases. The first results obtained in the Gotthard Base Tunnel can be considered excellent, validating the assumptions as well as the methodologies, already applied during the surveying of the Lötschberg Base Tunnel (main breakthrough on April 2005). At the first partial breakthrough in the Gotthard Base Tunnel, after approximately 19 km route, the horizontal deviation was just 92 mm. This is a great success for the surveying.

Introduzione

Nella progettazione e in modo particolare nella fase realizzativa dei nuovi trafori transalpini si pone il problema dell'orientamento dei lavori di scavo in sotterraneo. L'elevata lunghezza, innanzitutto, e l'impiego di fresatrici richiedono precisioni di tracciamento sempre più elevate, in quanto correzioni ad avanzamento concluso, comportano costi supplementari notevoli. In queste particolari condizioni in cui si deve operare, l'utilizzo dei metodi e degli strumenti tradizionali per il tracciamento dell'asse della galleria non soddisfano le esigenze poste. Vari studi, suffragati da lavori sperimentali dimostrano che per tunnel di lunghezza superiore a 20 km la precisione raggiungibile con i migliori teodoliti disponibili non è più sufficiente. Questa necessità di orientamento ad alta precisione in sotterraneo ha portato allo sviluppo dei teodoliti giroscopici, strumenti in grado di fornire misure di azimut riferite ad una direzione fissa universale. Diversi però

sono gli aspetti che occorre considerare per una corretta interpretazione dei valori forniti da questi strumenti, che risultano essere molto precisi ma anche molto delicati [Caprioli et al., 2003]. Solo con l'ausilio di sofisticati modelli è possibile ottenere la precisione richiesta e contribuire così in modo sostanziale al corretto avanzamento dei lavori. L'Istituto di Geodesia e di Fotogrammetria (IGP) del Politecnico Federale di Zurigo (ETHZ) esegue le misure giroscopiche per conto del consorzio d'ingegneria geodetica del progetto *AlpTransit*, il quale comprende la realizzazione della galleria di base del San Gottardo (60 km) e del Lötschberg (35 km). L'IGP dispone, per l'esecuzione delle misure giroscopiche, di uno strumento ad alta precisione e dell'infrastruttura per la calibrazione periodica dello stesso.

Il funzionamento del giroscopio

Il funzionamento del giroscopio si basa sulla legge di conservazione del momento angolare, ossia sulla proprietà di un corpo rigido, in rapida rotazione su uno dei suoi assi principali di inerzia, di opporsi alle forze esterne che tendono a spostare tale asse nello spazio. Un giroscopio consiste quindi in un disco di massa notevole che ruota a velocità elevata attorno all'asse di rotazione x , montato su un sistema cardanico che garantisce la possibilità di ruotare anche rispetto agli assi y e z (*figura 1*). Grazie all'inerzia giroscopica un giroscopio a 3 gradi di libertà, una volta messo in rotazione, si mantiene nello stesso piano in cui si trovava al momento dell'inizio del moto, indipendentemente dalla posizione assunta dal sistema. Se si blocca lo snodo cardanico intorno all'asse y , si sfrutta il moto di precessione che ha luogo ogni volta che gli assi lasciati liberi subiscono spostamenti dovuti a forze esterne. Il momento di forza (D_{ext}) che ne risulta è descritto nella formula seguente:

$$\vec{D}_{ext} = \frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \vec{\Omega} \times \vec{L} \quad (1)$$

Questo tipo di giroscopio, definito *North-seeking* per le sue caratteristiche, viene utilizzato in campo geodetico.

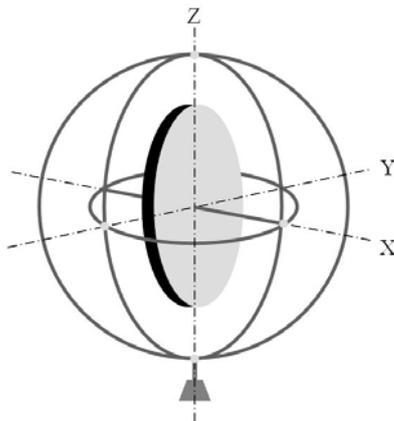


Figura 1: Sospensione cardanica

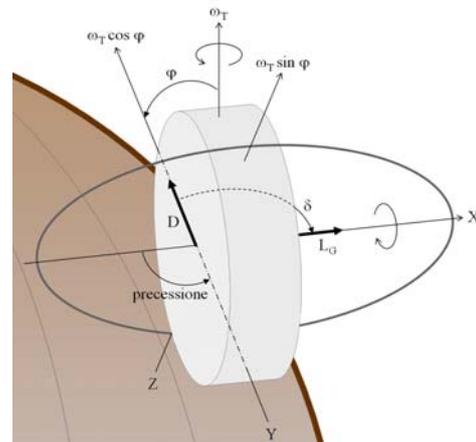


Figura 2: Principio fisico

Come schematizzato nella *figura 2*, l'asse di rotazione x del giroscopio geodetico si trova nel piano orizzontale per l'influsso della forza di gravità, che agisce lungo all'asse z . La rapida rotazione del disco produce un momento angolare L_G . La componente orizzontale della velocità angolare di rotazione della terra (ω_T), esercita un momento di forza D sul disco secondo la formula seguente:

$$D = \omega_T L_G \cos(\varphi) \sin(\delta) \quad (2)$$

Il momento D causa un movimento di precessione dell'asse di rotazione x , che, in una serie di oscillazioni smorzate, tende ad allinearsi al meridiano passante per il punto in cui il giroscopio stesso si trova. Ciò permette di avere un riferimento fisso rispetto a cui è possibile misurare azimuth astronomici. Infatti, in questa situazione l'angolo δ tra il meridiano e l'asse di rotazione del

giroscopio è zero. Di conseguenza il momento D è nullo, garantendo così la conservazione del momento angolare L_G . Dalla *formula 2* risulta altresì evidente l'influsso della latitudine φ : quanto più ci si avvicina ai poli, tanto minore sarà il momento D e il rispettivo effetto di precessione.

Il teodolite giroscopico

Il teodolite giroscopico si compone di tre elementi principali: il sistema portante o *involucro* nel quale è sospeso il *sistema oscillante* o giroscopio e il *teodolite* che sovrasta quest'ultimo. Nel dettaglio il giroscopio è appeso ad un nastro metallico ed è libero di oscillare (*figura 3*).

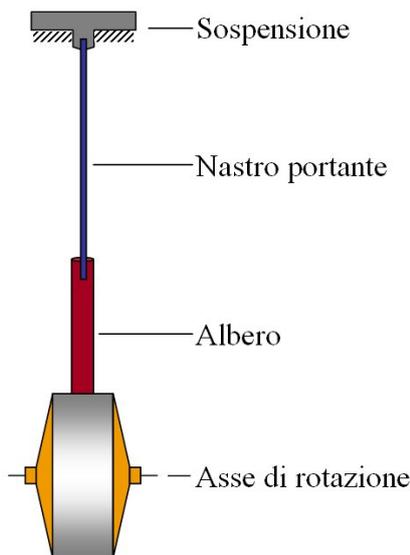


Figura 3: Sistema oscillante

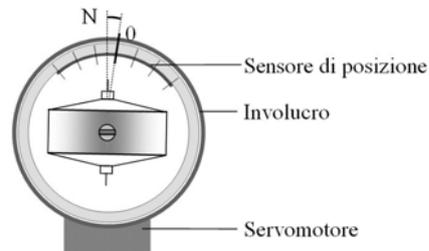


Figura 4: Orientamento del giroscopico

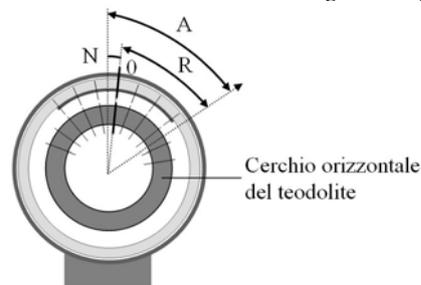


Figura 5: Misura dell'azimut

Tra gli strumenti in commercio, il modello più diffuso (*Gyromat-2000*) è prodotto dalla ditta DMT (*Deutsche Montan Technologie*) di Essen in Germania. Le oscillazioni del giroscopio vengono rilevate in modo continuo da un sensore di posizione fissato all'involucro. Lo strumento discretizza queste oscillazioni su un intero periodo e attribuisce automaticamente i valori misurati ad epoche discrete. Per integrazione, la media di queste serie di misure fornisce l'angolo di deviazione tra il centro dell'oscillazione (Nord astronomico) ed il riferimento optoelettronico del giroscopio (solidale all'involucro) [Desiderio, 1998]. Affinchè le oscillazioni non siano troppo grandi, il sistema è provvisto di un servomotore, che automaticamente entra in azione quando la torsione del nastro portante supera un certo limite, riportando lo zero del sensore approssimativamente nel centro dell'oscillazione. In questo modo le piccole oscillazioni avvengono simmetricamente rispetto all'indice di lettura e possono essere rilevate correttamente. L'orientamento meccanico dell'intero strumento non può essere ottenuto con sufficiente precisione, per cui il sensore di posizione fornisce una correzione numerica N da aggiungere all'angolo misurato con il teodolite sovrastante (*figura 4*). Il cerchio orizzontale di quest'ultimo ha il suo zero proprio in corrispondenza dello zero del sensore di posizione del giroscopio, e per tanto è possibile misurare qualsiasi azimut (*figura 5*).

Misure giroscopiche e riduzioni

Per poter utilizzare le misure fornite dal giroscopio nel proprio sistema di proiezione occorre correggere l'azimut α secondo la seguente formula [Zanini, 1992]:

$$t = \alpha - dA - \gamma + dT \quad (3)$$

- riduzione della sezione normale
- convergenza dei meridiani
- influenza della deviazione della verticale
- azimut astronomico
- azimut in proiezione

Il valore della **deviazione della verticale** interviene nel passaggio dall'azimut astronomico a quello riferito all'ellissoide applicando la seguente equazione di Laplace:

$$dA = \eta \tan \varphi + (\xi \sin \alpha - \eta \cos \alpha) \cot z \quad (4)$$

dove	η	componente della deviazione della verticale in direzione est-ovest
	ξ	componente della deviazione della verticale in direzione sud-nord
	φ	latitudine geografica
	z	angolo zenitale del punto osservato

Si vede subito che per misure approssimativamente orizzontali il secondo termine va a zero ($\cot z \cong 0$). Si osserva pure che la correzione per il territorio svizzero, compreso tra le latitudini 45° e 48° ha un ordine di grandezza che coincide sostanzialmente con il valore della componente est-ovest della deviazione della verticale (η). Al di là dell'accuratezza con cui si effettuano le misure giroscopiche, quindi, è altrettanto importante il calcolo preciso della deviazione della verticale in ogni punto in cui si effettuano misure giroscopiche. Considerare un valore errato di tale componente o ignorare del tutto la deviazione della verticale, porta ad una perdita di precisione considerevole, che rende addirittura inutilizzabili le misure fornite dal giroscopio [Zanini et al., 1993].

La **convergenza dei meridiani** indica l'angolo formato dalla direzione geografica Nord con il Nord del sistema di coordinate utilizzato. Questa correzione permette di passare dall'azimut riferito all'ellissoide a quello riferito al piano di proiezione. La linea, misurata con il teodolite sulla sfera terrestre, se proiettata sulla superficie dell'ellissoide con un piano verticale nel punto di stazione e passante per il punto collimato è detta **sezione normale**. Tale linea si discosta di una quantità dT dalla retta che unisce gli stessi due punti nel piano di proiezione. Per tanto l'azimut misurato dovrà essere ulteriormente corretto dal valore dT per ottenere l'azimut t nel sistema di proiezione adoperato. Per la proiezione svizzera si utilizza la formula seguente:

$$dT = \frac{\rho}{6R^2} (y_A - y_B)(x_B + 2x_A) \quad (5)$$

dove	ρ	costante di trasformazione da radianti a secondi centesimali
	R	raggio della terra
	x_A, y_A	coordinate cartografiche del punto di stazione
	x_B, y_B	coordinate cartografiche del punto collimato

Metodologia di misura e calibrazioni

La rete geodetica per la costruzione di un tunnel è costituita da una rete principale superficiale, rilevata con sessioni GPS e possibilmente integrata da vertici trigonometrici. Ad essa viene collegata una rete secondaria costituita da punti distribuiti con una buona densità nella zona del portale. Quest'ultima fornisce l'orientamento della poligonale, che si sviluppa all'interno del tunnel.

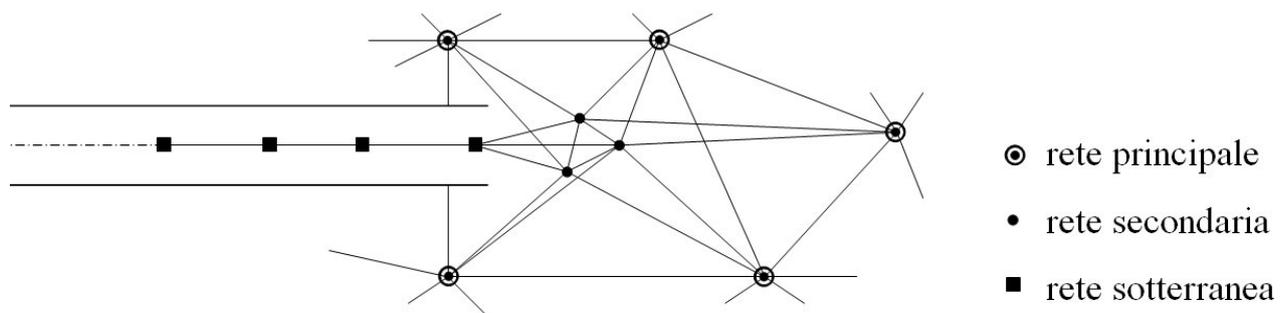


Figura 6: rete geodetica

Con il teodolite giroscopico si misura almeno un lato (possibilmente lungo) della rete esterna al tunnel e successivamente si misurano alcuni lati della poligonale all'interno del tunnel, portandovi l'orientamento della rete principale con la stessa precisione indipendentemente dalla distanza dal

portale. In questo modo si rimedia all'errore laterale della poligonale che, invece, cresce con la distanza dal portale, come illustra la formula seguente:

$$m_l = Lm_\beta \sqrt{\frac{n}{3}} \quad (6)$$

dove m_l errore laterale
 L lunghezza totale della poligonale
 n numero di lati della poligonale
 m_β errore medio degli angoli orizzontali

Per ottenere l'alta precisione richiesta alle misure giroscopiche è necessario considerare adeguatamente tutti i fattori che influenzano la qualità della misura. Uno di questi fattori è la temperatura, che influisce sulla rigidità e sulle proprietà dei materiali dello strumento. Le misure sul terreno richiedono quindi grande competenza ed esperienza da parte dell'operatore per poter escludere, o quanto meno minimizzare, gli influssi negativi dei vari fattori locali, come appunto le condizioni climatiche, le vibrazioni o altro.

Nel caso del *Gyromat-2000*, un sensore rileva la temperatura e lo strumento corregge automaticamente le misure in base ad una funzione di calibrazione sperimentale. Ciò permette di ottenere ottimi risultati anche in presenza di forti gradienti tra l'esterno e l'interno della galleria. Per effetto dell'usura e dell'invecchiamento, le caratteristiche dei materiali, assunte nella funzione di calibrazione, possono variare influenzando la qualità delle misure ottenute. Allo scopo di controllare questa variabile, l'IGP effettua cicli regolari di misure a temperature oscillanti tra -10° e $+40^\circ\text{C}$ in una camera climatica nel proprio laboratorio geodetico. I valori rilevati descrivono normalmente un tipico comportamento d'isteresi. Eventuali anomalie possono essere corrette mediante l'uso di una funzione di calibrazione lineare derivata dalle misure. Cicli specifici possono essere misurati a posteriori in laboratorio riproducendo esattamente l'andamento della temperatura rilevato durante la campagna di misure. Ciò permette, se necessario, di elaborare una funzione di calibrazione *ad hoc*.

La temperatura influenza anche le osservazioni angolari all'interno del tunnel: il gradiente esistente tra le pareti e la zona centrale del tunnel genera problemi di rifrazione. Per ovviare, o quanto meno ridurre l'influsso di tale inconveniente è necessario che i vertici della poligonale siano disposti lungo l'asse del tunnel, e che, in presenza di curve nel tracciato, i lati della poligonale siano opportunamente accorciati.

La fase di *post-processing* delle misure acquisite richiede particolare attenzione. Molti dei fattori da considerare nell'elaborazione sono noti, come esposto nel capitolo precedente. Prerogativa per un risultato di alta precisione è l'utilizzo di modelli molto accurati, come per esempio il modello del geoide da cui derivare le componenti della deviazione della verticale per i punti stazionati con il giroscopio. Particolare attenzione va anche prestata al modello della compensazione delle misure. In tal senso vi sono più approcci possibili, di cui uno si è dimostrato particolarmente valido, sulla base sia di lavori sperimentali che di applicazioni pratiche. Quest'ultimo tiene conto di un'incognita additiva relativa allo strumento e dell'orientamento (ev. incognito) del sistema di coordinate: nella compensazione tali fattori sono trattati come un'incognita di orientamento comune a tutte le misure di una stessa epoca. Nel modello stocastico, invece, è necessario stimare l'accuratezza con cui sono state eseguite le misure, dato utile per la formazione della matrice dei pesi. Il modello può essere esteso alle altre misure geodetiche eseguite per determinare l'orientamento dei lavori di scavo, permettendo una compensazione globale secondo il metodo dei minimi quadrati che offre risultati molto accurati e affidabili.

Risultati

I risultati ottenuti per il tunnel di base del Lötschberg, nel quale i lavori di scavo si sono conclusi nel 2005 e per le perforazioni finora realizzate nel tunnel di base del Gottardo sono ragguardevoli [Stengele, 2007]. Gli scarti laterali al momento della congiunzione delle poligonali libere sono molto piccoli. La tolleranza concordata prima dell'inizio degli scavi è stata, così, ampiamente rispettata, come mostrano le illustrazioni seguenti (figura 7 e 8):

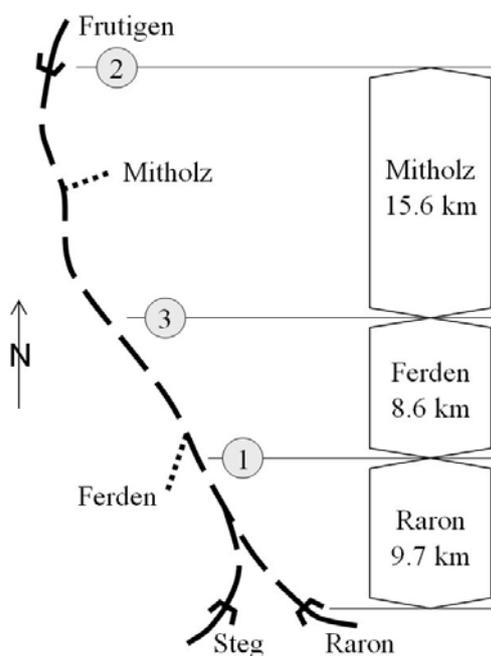


Figura 7: Tunnel di base del Lötschberg

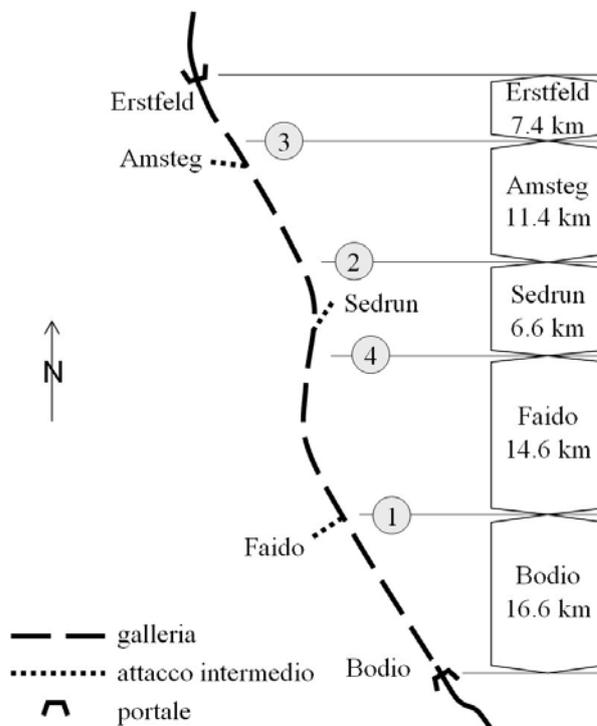


Figura 8: Tunnel di base del Gottardo

Punto	Scarto laterale	Tolleranza (2.5σ)	Punto	Scarto laterale	Tolleranza (2.5σ)
1	-	-	1	9.2 cm	25.0 cm
2	-	-	2	Previsto per ottobre 2007	
3	13.4 cm	25.0 cm	3, 4	Lavori sono in corso	

L'IGP ha contribuito con un elevato numero di misure giroscopiche (ca. 600 per il Lötschberg e finora ca. 300 per il Gottardo). Queste misure, combinate con le altre effettuate dalle ditte partecipanti al consorzio d'ingegneria geodetica, hanno permesso di raggiungere risultati eccellenti. Tutti i calcoli finora eseguiti confermano la validità dei modelli sia funzionali che stocastici utilizzati nel trattamento dei dati.

Bibliografia

- Caprioli M, Carosio A, Manera M. (2003), *Tecniche di misura di alta precisione in galleria con il teodolite giroscopico*, Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, 3: 43-58
- Desiderio A, Koch R. (1998), *Der Einfluss der Temperatur auf Kreiselmessungen hoher Präzision*, rapporto IGP No. 281, ETH Zurigo
- Stengele R. (2007), *Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel: Tunnelvermessung in der Praxis*, 15th International Course on Engineering Surveying, Graz
- Zanini M. (1992), *Hochpräzise Azimutbestimmungen mit Vermessungskreisen*, rapporto IGP No. 209, ETH Zurigo
- Zanini M, Stengele R, Plazibat M. (1993), *Kreiselaзимute in Tunnelnetzen unter Einfluss des Erdschwerefeldes*, rapporto IGP No. 214, ETH Zurigo