

Studio dell'effetto della gravità su circuiti chiusi della livellazione di alta precisione in presenza di dislivelli molto elevati

G. Gentile (*), R. Maseroli (*), F. Sacerdote (**)

(*) Istituto Geografico Militare di Firenze

(**) DICEA, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Firenze.

Riassunto

In questo lavoro si vuole descrivere qualitativamente e quantitativamente l'influenza del dato gravimetrico sui poligoni altimetrici della rete di livellazione di alta precisione italiana, che si sviluppano lungo percorsi dove si osservano notevoli variazioni di quota in brevi tratti. Tale influenza può essere determinata eseguendo la chiusura altimetrica dei poligoni in quote geopotenziali, lungo percorsi chiusi dove deve essere necessariamente presente la misura della gravità, secondo procedure ampiamente descritte in letteratura. A titolo di esempio il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Firenze in collaborazione con l'Istituto Geografico Militare e il Politecnico di Milano, hanno analizzato l'errore di chiusura dei poligoni in quote geopotenziali rispetto all'errore di chiusura dei poligoni in quote "brute", ottenute dalla livellazione geometrica di alta precisione. Nello specifico si è applicata la procedura di calcolo studiata ad un percorso chiuso fra Piemonte e Valle d'Aosta, in quanto l'errore di chiusura altimetrico risulta essere al disopra della tolleranza richiesta. Tale percorso presenta un dislivello che supera i 2000m, ed è interessante anche dal punto di vista geologico, in quanto esistono delle anomalie di gravità positive e negative causate dalla presenza corpi geologici superficiali e profondi ad alta densità. Per queste ragioni esso è particolarmente adatto per verificare l'influenza delle variazioni della gravità nelle misure di livellazione geometrica.

Abstract

The influence of gravity measurements on the altimetric profiles of the Italian high precision leveling network, particularly in presence of relevant height variations on short distances, is qualitatively and quantitatively discussed. This influence can be determined considering the residuals of geopotential numbers along closed profiles, where gravity measurements must be available, according to procedures widely illustrated in literature. As an example, the Department of Civil and Environmental Engineering of Florence University, in collaboration with the Italian Military Geographic Institute, have compared the residuals of geopotential numbers and of adjusted height differences resulting from high precision geometric leveling along a closed profile between Piemonte and Aosta Valley in North-Western Italy, where leveling residuals are above tolerance. Indeed, the height difference along this profile is larger than 2000m, and the region is particularly interesting from the geological point of view, as it presents negative and positive gravity anomalies due to high density surface and deep geological bodies. For these reasons it is particularly fit to verify the influence of gravity variations on geometric leveling residuals.

Lo stato dell'arte dell'altimetria in Italia e in Europa

Il datum di altezza ufficiale sul territorio italiano è definito dalla rete di livellazione di alta precisione istituita dall'IGM, che si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 20.000km (vedi figura 1). Le quote attribuite ai capisaldi, che sono distanziati all'incirca di 1km, risultano dalla compensazione delle misure di livellazione geometrica eseguite lungo l'intera rete e periodicamente ripetute.

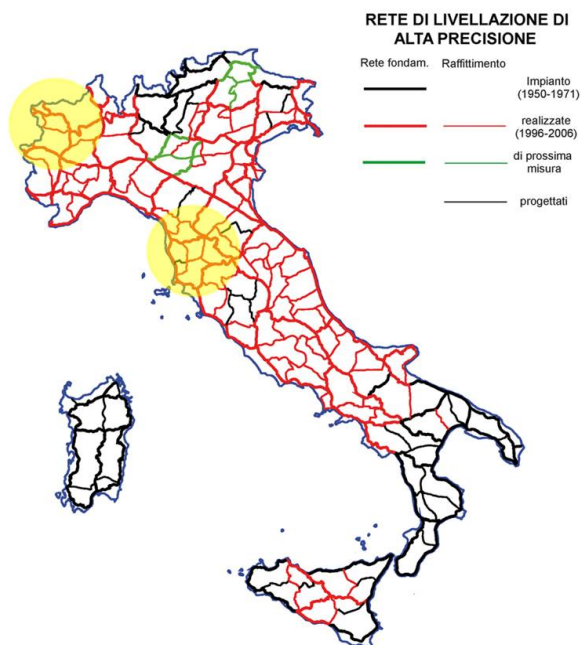


Figura 1 – Rappresentazione delle linee della Rete di livellazione italiana di alta precisione. In giallo sono rappresentate le aree interessate, (fonte IGM, Istituto Geografico Militare).

Inoltre, negli anni '70 del '900 sono state eseguite misure di gravità su gran parte dei capisaldi delle linee allora esistenti (linee disegnate in grassetto, vedi figura 1), per la partecipazione dell'Italia alle attività UELN (United European Levelling Network), [3], che richiedeva il calcolo di quote geopotenziali compensate sui nodi della rete, allo scopo di realizzare un'unica rete di livellazione che coprisse il territorio di tutti i paesi dell'Europa occidentale [9], [10]. Queste misure sono documentate nei tabulati IGM, ma non risulta alcuna pubblicazione scientifica relativa alla loro elaborazione.

Successivamente, negli anni '90 sono state prodotte nuove soluzioni UELN, che tenevano conto sia della partecipazione di nuovi paesi, prevalentemente dell'Est europeo, sia del raffittimento delle reti altimetriche di diversi paesi dell'Europa centro-settentrionale.

Negli stessi anni, con l'istituzione della rete EUREF di stazioni permanenti GPS, è stato avviato il progetto EUVN, [2], [3] (European Vertical Network) con lo scopo di stabilire un collegamento fra la rete di livellazione europea e il sistema di riferimento definito da EUREF. Si è così giunti all'istituzione del sistema di riferimento verticale EVRS (European Vertical Reference System), le cui successive realizzazioni tengono conto degli aggiornamenti dei dati altimetrici forniti dai vari paesi [11], [12].

Anche l'Italia ha dato di recente un contributo a quest'ultima fase di elaborazione fornendo i dati relativi a circa 80 stazioni distribuite su tutto il territorio nazionale.

E' da osservare che le prime soluzioni EUVN presentavano forti discrepanze in varie parti del territorio Europeo rispetto al modello di geoide europeo allora disponibile, EGG97 (vedi figura 2); soluzioni più recenti, basate sul modello di geoide EGG08 (vedi figura 3), forniscono risultati nettamente più accettabili, con l'eccezione della Gran Bretagna, anche se è ancora evidente un tilt nella direzione NE-SW [5].

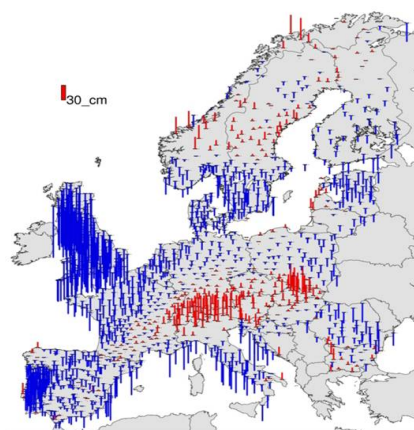


Figura 2 – EUVN-DA and EGG97 height anomaly differences, [5].

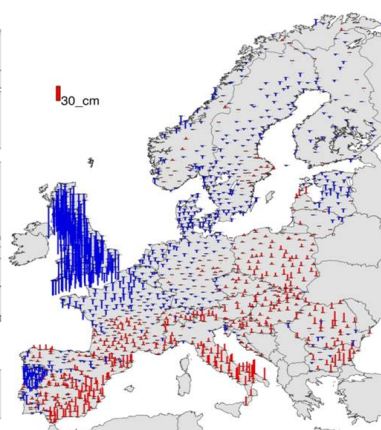


Figura 3 – EUVN-DA and EGG98 height anomaly differences, [5].

Introduzione al problema: le superfici equipotenziali

E' noto che, a causa del non parallelismo delle superfici equipotenziali del campo della gravità, i dislivelli misurati lungo profili con la livellazione geometrica dipendono non solo dai punti di partenza e di arrivo ma anche dal percorso, e quindi in linea di principio non sono direttamente utilizzabili per la determinazione delle quote, [1].

Di fatto, tuttavia, le differenze di dislivelli su percorsi diversi in generale sono al più dello stesso ordine di grandezza degli errori casuali di misura. Di conseguenza, anche nelle reti di livellazione di alta precisione, come quella istituita dall'IGM sul territorio nazionale, si usa compensare gli scarti di chiusura sulle maglie della rete come se fossero dovuti unicamente a errori di misura.

Fanno eccezione i percorsi che presentano dislivelli molto elevati, in particolare in aree geologicamente disomogenee, in cui si possono presentare forti differenze nelle densità delle rocce.

E' questo il caso dall'area compresa fra Piemonte nord-occidentale e Valle d'Aosta, dove in effetti lo scarto di chiusura della livellazione su un percorso chiuso con dislivelli superiori ai 2000m è risultato significativamente fuori tolleranza.

La verifica della qualità della campagna di misure di livellazione può essere fatta considerando gli scarti di chiusura delle differenze di potenziale del campo della gravità, che dipendono solo dagli estremi e non dal particolare cammino percorso, e richiede che siano eseguite misure gravimetriche lungo il percorso. Queste misure non sono però disponibili su gran parte del percorso esaminato.

La presente ricerca, che si avvale anche del contributo di ricercatori del DIAR del Politecnico di Milano e del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, ha lo scopo di fare una ricognizione dei dati di gravità disponibili nell'area di interesse, della loro accuratezza e della possibilità di eseguire interpolazioni lungo i profili di livellazione sufficientemente accurate per consentire un calcolo delle differenze di potenziale utilizzabile per la verifica della campagna di livellazione.

Verifiche eseguite su altri profili di livellazione lungo i quali erano disponibili dati gravimetrici hanno mostrato che, dove la densità di misure di gravità nell'area è sufficientemente elevata, anche i valori interpolati lungo il profilo consentono stime delle differenze di potenziale sufficientemente accurate.

Calcolo dei dislivelli geopotenziali

In una prima fase si sono presi come dati di partenza i dati grezzi di livellazione di alta precisione non compensati nei capisaldi in cui si aveva il corrispondente valore di gravità. A questi dati si è applicata la seguente procedura di calcolo per la determinazione del dislivello geopotenziale:

- si sono ordinate le linee di livellazione con riferimento sul caposaldo di chiusura;
- si sono calcolati i dislivelli progressivi tra punti scelti lungo le linee di livellazione di alta precisione $\Delta = Q_B - Q_A$;
- si è calcolato il dislivello geopotenziale progressivo tra punti successivi

$$\Delta_{geop} = \Delta \times 0,5 \times (g_B + g_A)$$

Il calcolo è stato applicato in un primo tempo al poligono in Toscana costituito dalle linee 27, 28, 29, e 30 della rete IGM. I risultati ottenuti hanno permesso di capire che il valore della chiusura altimetrica derivante dai dati di livellazione viene migliorato, con l'applicazione della procedura, di circa il 13%, risultato di per se buono ma poco significativo.

Tale risultato porta alle seguenti considerazioni:

1. nelle linee di livellazione eseguite in zone pianeggianti (lungo i fondi valle), dove non competono grosse variazioni di quota, l'apporto della correzione di gravità è di piccola entità.
2. la correzione di gravità applicata a poligoni chiusi sui cui competono notevoli variazioni di quota potrebbe portare a risultati significativi.

Quindi ci si è posti il problema di dove applicare la procedura studiata. A tal fine in collaborazione con l'Istituto Geografico Militare si è scelto il poligono di IVREA costituito dalla linea 155 e da un tratto della linea AF della rete IGM (vedi figura 4), dove si osservano notevoli variazioni di quota, in brevi tratti.

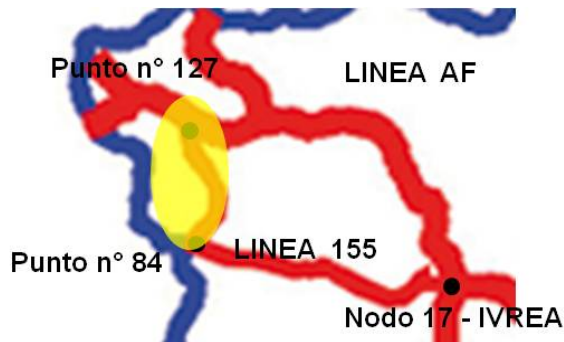


Figura 4 – Rappresentazione delle linee di livellazione della Rete relative al poligono di Ivrea, in giallo è rappresentata la zona in cui mancano i dati gravimetrici (fonte IGM, Istituto Geografico Militare).

I dati gravimetrici sul percorso scelto presentano una notevole eterogeneità: in parte (lungo la linea AF) sono stati misurati negli anni 50 – 70 con strumenti ormai obsoleti (con gravimetri di tipo Askania - Worden), altri (nel tratto Ivrea-Nivolet della linea 155) sono stati misurati recentemente (nel 2006 con il gravimetro La Coste & Romberg) con strumenti moderni, altri (nel tratto Nivolet-Villeneuve della linea 155, dove non sono disponibili misure dirette) sono stati interpolati utilizzando la base di dati utilizzata per il geode nazionale. E' quindi essenziale valutare l'influenza degli errori di misura di g nel calcolo di ΔW e l'influenza delle variazioni del gradiente di gravità.

La scelta del poligono di Ivrea è dovuta non soltanto alla presenza di notevoli dislivelli lungo il percorso, ma anche al particolare andamento del campo di gravità nell'area, dovuto alla particolare conformazione geologica. Infatti nella zona di Ivrea esiste una struttura cristallina, formatasi all'interno del mantello, che risale verso l'interno della crosta continentale sovrastante. Tale fenomeno pare sia generato dalla Orogenesi Alpina.

Tale corpo ad elevata densità orientato in direzione NE-SW è chiamato “*Corpo di Ivrea*”, e produce svariati effetti valutati in termini di variazioni anomale del campo della gravità terrestre, in variazioni anomale del campo magnetico terrestre e in variazione della velocità della propagazione delle onde sismiche [6], che attestano la posizione dello stesso a circa 10 km di profondità.

In particolar modo nella figura 5 viene mostrato il campo delle anomalie di Bouguer del Nord-ovest dell’arco alpino, dove vengono evidenziate le distribuzioni delle anomalie negative e positive nell’area; in particolare si osserva la presenza di una forte anomalia positiva compresa tra gli 80-120 mgal, orientata in direzione NE-SO in prossimità della zona Ivrea.

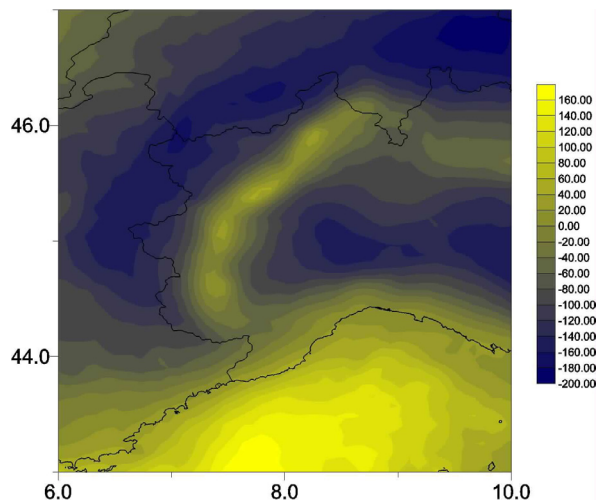


Figura 5 – Anomalie di Bouguer (mgal) nelle Alpi nordoccidentali [6].

Generalmente le anomalie positive sono tipiche delle zone oceaniche, a causa di fenomeni di disequilibrio isostatico dovuto al minor peso delle acque e delle rocce sottostanti rispetto al peso delle rocce in zona continentale; infatti come si può osservare nella parte in basso della figura 5 più ci si sposta verso il centro del Mare Tirreno più le anomalie divergono verso valori positivi.

La presenza di rocce provenienti dal mantello situate all’interno della crosta spiegherebbe le forti anomalie positive presenti. Questa struttura a causa della sua eccessiva densità influenzerebbe alcune osservazioni geodetiche quali le anomalie di gravità, la deviazione della verticale e le chiusure relative ad operazioni di livellazione di alta precisione.

L’influenza delle variazioni del gradiente di gravità

Si è già osservato che in generale nelle reti di livellazione l’effetto della dipendenza dal cammino percorso è inferiore all’incertezza dovuta agli errori casuali di misura, che usualmente nei percorsi chiusi viene considerata proporzionale alla radice quadrata della lunghezza del profilo e dell’ordine di 2mm per un percorso di 1km, e viene quindi espressa dalla formula $\Delta h = 2\sqrt{l}$, dove Δh è espresso in mm e l in km, [8].

In effetti nella rete di livellazione nazionale di alta precisione istituita dall’IGM gli scarti di chiusura su gran parte dei percorsi chiusi risultano essere entro la tolleranza, e per questa ragione si è ritenuto che una compensazione di tipo tradizionale fornisce risultati ampiamente accettabili.

D’altra parte, le differenze di geopotenziale, date dall’espressione $\Delta W = \int g dh$, [7], [14], dipendono soltanto dagli estremi e non dal particolare percorso scelto, e quindi gli scarti di chiusura dipendono soltanto da errori nelle misure e da approssimazioni nelle procedure di calcolo, [13].

In effetti il loro calcolo richiede la discretizzazione dell'integrale e la misura di g lungo il percorso, e contiene quindi errori legati sia all'accuratezza delle misure gravimetriche sia alla loro densità lungo il percorso.

Ovviamente ΔW non è direttamente confrontabile con Δh , avendo una diversa dimensione fisica. Lo è invece l'altezza dinamica, definita dal rapporto $\Delta h_{dm} = \Delta W/g_0$, dove g_0 è un qualunque valore costante della gravità [7], [14].

Poiché g_0 è molto vicino a 1kgal, il valore di Δh_{dm} espresso in m è prossimo al valore di ΔW espresso in kgal-m. Assumendo che la gravità vari linearmente con l'altezza: $g = g_0 + g'(h - h_0)$, si ottiene:

$$\Delta h_{dm} = \frac{\Delta W}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_{h_0}^{h_0 + \Delta h} g dh = \Delta h + \frac{1}{g_0} \int_{h_0}^{h_0 + \Delta h} (g - g_0) dh = \Delta h + \frac{1}{2} \frac{g'}{g_0} \Delta h^2$$

Assumendo per g' un valore di -0.3mgal/m (vicino al valore del gradiente della gravità normale all'esterno dell'ellissoide in prossimità della superficie), si verifica che il termine correttivo quadratico nel dislivello assume valori che incominciano ad essere significativi per dislivelli di alcune centinaia di metri (ad esempio 6mm per $\Delta h=200m$) e decisamente grandi per dislivelli maggiori raggiungibili sul nostro territorio (60cm per $\Delta h=2000m$).

Per avere un'idea quantitativa dell'influenza delle variazioni del gradiente di gravità, si considerino 2 diversi percorsi fra 2 punti. Si ha un uguale valore di ΔW , e quindi di Δh_{dm} , mentre sono diversi Δh e g' . Quindi

$$\Delta h_1 + \frac{1}{2} \frac{g'_1}{g_0} \Delta h_1^2 = \Delta h_2 + \frac{1}{2} \frac{g'_2}{g_0} \Delta h_2^2$$

Posto $\Delta h_2 = \Delta h_1 + \delta h$ si ottiene

$$\delta h = \frac{1}{2g_0} [g'_2 \Delta h_1^2 - g'_1 (\Delta h_1 + \delta h)^2]$$

Da cui, trascurando i termini di ordine $(\frac{\delta h}{\Delta h_1})^2$, si ricava

$$\delta h \left(1 + \frac{g'_2 \Delta h_1}{g_0} \right) = \frac{1}{2g_0} (g'_1 - g'_2) \Delta h_1^2$$

Per fare un esempio numerico, assumendo $g'_1 - g'_2 \cong 0.02 \text{mgal/m}$ per $\Delta h_1 \cong 1000m$ si ottiene $\delta h \cong 1cm$.

L'influenza degli errori di misura della gravità

Per valutare l'influenza degli errori di misura di g nel calcolo di ΔW , si consideri la formula discretizzata $\Delta W = \sum \bar{g}_i \Delta h_i$, dove $\bar{g}_i = \frac{g_i + g_{i-1}}{2}$.

L'espressione dell'errore è

$$\delta \Delta W = \sum \delta \bar{g}_i \Delta h_i + \sum \bar{g}_i \delta \Delta h_i$$

Il primo addendo esprime il contributo degli errori sulle misure di gravità. La sua varianza è data da

$$E \left\{ \left(\sum \delta \bar{g}_i \Delta h_i \right)^2 \right\} = \sum \Delta h_i \Delta h_i E \{ \delta \bar{g}_i \delta \bar{g}_i \}$$

Si assume che le misure di gravità siano statisticamente indipendenti e tutte con lo stesso sqm $\sigma(g)$. Di conseguenza, data l'espressione di \bar{g}_i , si ha correlazione soltanto fra termini consecutivi della sommatoria.

In ultima analisi si ottiene

$$E \{ (\sum \delta \bar{g}_i \Delta h_i)^2 \} = \frac{1}{2} \sigma^2(g) (\sum \Delta h_i^2 + \sum \Delta h_i \Delta h_{i+1})$$

Come si vede, il valore di questa grandezza è fortemente dipendente dal profilo altimetrico. Per fare un esempio di interesse per la presente discussione, si assuma un dislivello complessivo di 2000m suddiviso in 20 tratti di 100m ciascuno.

Ponendo $\sigma(\rho) = 10$ mgal, si ottiene $(E\{\sum \sigma(\rho_i) \Delta h_i\})^{1/2} \approx 4$ gal·m, corrispondenti in termini di dislivello a circa 4mm. Quindi non è necessario disporre di dati gravimetrici di elevata accuratezza per il calcolo delle differenze di geopotenziale.

Si è già visto che le quote della rete nazionale di livellazione di alta precisione sono ottenute per compensazione delle misure di livellazione senza tenere conto degli effetti gravimetrici, e che, d'altra parte, lungo gran parte delle linee di livellazione sono state eseguite misure di gravità negli anni '70 del '900.

Tuttavia, come si è già osservato, per alcune linee istituite dopo quella data le misure di gravità non sono disponibili, e fra queste ve ne sono alcune d'alta montagna che sono particolarmente significative per il presente studio. Si è quindi optato per l'uso di valori della gravità interpolati nei capisaldi di livellazione a partire dalla base di dati gravimetrici nazionale utilizzata anche per il calcolo delle diverse versioni del geoido gravimetrico ITALGEO.

Le incertezze rientrano pienamente nei limiti sopra illustrati, e anche il confronto con i valori misurati lungo linee dove essi sono disponibili mostra la piena accettabilità dell'uso di valori interpolati.

Calcolo dei dislivelli geopotenziali nel poligono di Ivrea

Le principali caratteristiche dei dati altimetrici e gravimetrici lungo le linee del poligono di IVREA sono state descritte in precedenza. E' da notare che la quota varia da 245 metri del nodale 17 a 2616 metri nel punto n°84 della linea 155.

La procedura di calcolo utilizzata per il calcolo dei numeri geopotenziali e la seguente:

- si sono ordinate le linee di livellazione con riferimento sul nodale 17 a Ivrea;
- si è calcolato il valore della tolleranza sul poligono, che è pari a 3,15 cm relativa ad un percorso di circa 247 km
- si sono calcolati i dislivelli altimetrici progressivi, la cui somma algebrica è 6,987 cm, più del doppio del valore della tolleranza dichiarata;
- si sono calcolati i dislivelli geopotenziali progressivi tra punti successivi, la cui somma algebrica è di 2,347 cm.

Tale risultato ha portato alle seguenti considerazioni:

- la chiusura in dislivelli in geopotenziali evidenzia una migliore rappresentazione fisica del territorio, nel caso specifico lo scarto di chiusura si riduce a un terzo;
- le riduzioni degli scarti di chiusura a seguito delle correzioni per gravità lungo linee chiuse di livellazione dove competono notevoli variazioni di dislivello sono più significative di quelle ottenute lungo circuiti dove non competono notevoli variazioni di dislivello (per esempio nel poligono toscano si è valutato un miglioramento del 13% circa).

Sulla base dei dati in possesso si è cercato di stimare la variazione del gradiente di gravità lungo due tratti della linea AF e della linea 155 dove compete approssimativamente la stessa variazione di quota.

Linea AF			Linea 155		
Nome punto	Quota (metri)	Gravità (kgal)	Nome punto	Quota (metri)	Gravità (kgal)
Nodo 17	245,41770	0,98066636	Nodo 17	245,41770	0,98066636
Punto 128	2158,51346	0,98010747	Punto 75	2093,43712	0,980102098
Differenze	1913,09576	0,00055889	Differenze	1848,01926	0,00056426
$\Delta g/\Delta h$ (mgal/m)	0,292		$\Delta g/\Delta h$ (mgal/m)	0,305	

Questo risultato confermerebbe che l'andamento del gradiente di gravità nei due tratti è pressoché lo stesso, per cui l'esempio precedentemente citato assumendo un per g' pari a 0.3mgal/m risulta descrivere correttamente quanto ipotizzato.

Conclusioni

Da quanto esposto e verificato sui percorsi oggetto di studio, emerge che in generale la chiusura in termini geopotenziali risulta sia qualitativamente che quantitativamente migliore della chiusura in termini altimetrici.

Questo deriva dal fatto che la correzione gravimetrica, variando con la quota e tenendo conto delle masse interposte, riduce maggiormente le chiusure geopotenziali lungo poligoni dove si osservano notevoli variazioni di quota, come si è visto per il poligono di Ivrea.

In particolare emerge lo stretto legame tra il valore di gravità e la conformazione geologica dell'area d'interesse. Infatti la differenza in valore e segno delle anomalie di gravità permettono di identificare la presenza di strutture geologiche ad alta densità rispetto quelle presenti nella zona, che influenzerebbero nel caso specifico le operazioni di livellazione di alta precisione.

Pertanto essendo l'Italia un paese densamente montuoso soprattutto lungo l'arco alpino, ci proporremo di sperimentare la chiusura in termini geopotenziali lungo altri poligoni di confine della rete di livellazione di alta precisione italiana.

Bibliografia

- [1] Baldi P., Barzaghi R., Sacerdote F., Sansò F. et alii, (1999), "Sviluppi nella definizione del datum altimetrico" atti della III conferenza ASITA – Napoli, 9-12 Novembre 1999.
- [2] Ihde J., Adam J., Gurtner W., et alii, (1997), "The concept of the European Vertical GPS Reference Network (EUVN)" Report of the Results of the European Vertical Reference Network GPS Campaign 1997.
- [3] Ihde J., Sacher M., Makinen J., "European Vertical Reference System (EVRS) 2007 – a combination of UELN and ECGN" Activities of the technical Working Group.
- [4] Ihde J., Adam J., Gurtner W., Harsson B. G., Sacher M., Schlüter W., Höppelmann G., "The height solution of the European Vertical Reference Network (EUVN).
- [5] Kenyeres A., Sacher M., Ihde J., Denker H., Marti U., (1997), "Status and results of the EUVN Densification Action" Activities of the technical Working Group (TWG)/Status of the EUREF Permanent Network (EPN).
- [6] Maggi A. (2008) "Integrated collocation for local geoid estimation" - Doctoral thesis, Polytechnic of Milan.
- [7] Moritz H., Heiskanen W. A. (1967), "Physical Geodesy", W. H. Freeman and Company.
- [8] Muller G. (1986), "Appunti di livellazione", collezione testi didattici – Istituto Geografico Militare
- [9] Sacher M., Ihde J., Lang H., "Status and results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN – 95)" Readjustment of the UELN and EVS-2000.
- [10] Sacher M., Ihde J., Makinen J., "European Vertical Reference System (EVRS) 2007" – a. Combination of UELN and ECGN.
- [11] Sacher M., Ihde J., Makinen J. (2009), "EVRS2007 as realization of European Vertical Reference System" – Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol LXVIII, n.1.
- [12] Sacher M., Ihde J., Svensson R., "Status of UELN and steps on the way to EVRS 2007" European Vertical Reference System (EVRS) / Height Systems.
- [13] Salvioni G. (1953), "Sulla correzione da apportare alle livellazione di precisione per il non parallelismo delle superfici equipotenziali" Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol XII, n.4.
- [14] Torge W. (1989), "Gravimetry". De Gruyter.