

Rapporti tecnici

INGV

Aggiornamento tecnologico e
test funzionali del gravimetro da fondo
LaCoste & Romberg modello U-HG24

213



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

AGGIORNAMENTO TECNOLOGICO E TEST FUNZIONALI DEL GRAVIMETRO DA FONDO LACOSTE & ROMBERG MODELLO U-HG24

Cosmo Carmisciano¹, Giovanna Berrino², Luca Cocchi¹, Filippo Muccini¹, Francesco Gasparoni³,
Flavio Furlan³, Riccardo De Paulis⁴

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano)

³Tecnomare SpA, Marghera

⁴ENI SpA (AESI, San Donato Milanese)

213

Indice

Introduzione	5
1. Cenni storici e descrizione dello strumento	5
2. Aggiornamento tecnologico dello strumento	11
3. Test di laboratorio	15
4. Test gravimetrici di fondo mare	17
5. Conclusioni	27
Conclusioni	27

Introduzione

Nel presente lavoro viene descritto l'aggiornamento tecnologico, effettuato in collaborazione con la società Tecnomare SpA, di un gravimetro da fondo LaCoste & Romberg modello U, serie H (numero HG24), di proprietà dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sono inoltre descritti e brevemente discussi i primi test in laboratorio ed i risultati di misure gravimetriche di fondo mare effettuate dal 19 al 22 Luglio 2010 nell'Area Marina Protetta del Parco Nazionale delle Cinque Terre. L'acquisizione di dati gravimetrici rientrava nelle attività specifiche del progetto di ricerca InSAS promosso e finanziato da eni Spa. La campagna a mare InSAS si è svolta in collaborazione con il NURC (*NATO Undersea Research Centre*) utilizzando come vettore marino il *Coastal Research Vessel* (CRV) 'Leonardo'. Contestualmente all'attività di misure di gravità di fondo, sono stati acquisiti ed elaborati dal Politecnico di Milano diversi set di dati interferometrici *Synthetic Aperture Sonar* (SAS) su alcuni riflettori attivi e passivi localizzati nell'area di indagine.

La campagna di misure a mare è stata preceduta da una serie di test in laboratorio al fine di valutare la piena funzionalità dello strumento in esame. In questa fase sono state acquisite diverse serie temporali allo scopo di valutare la qualità della misura e la sua ripetibilità.

1. Cenni storici e descrizione dello strumento

Il gravimetro da fondo LaCoste & Romberg (LCR), modello HG n.24, è stato acquisito dall'Osservatorio Vesuviano (attualmente Sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) nella seconda metà degli anni '80 ed è uno dei primi dell'ultima serie "U" ad essere stato distribuito (Figura.1.1).



Figura 1.1. Il gravimetro da fondo LaCoste & Romberg, modello U.

Il gravimetro da fondo LCR è costituito fondamentalmente da un gravimetro terrestre (LCR modello G, avente sensibilità di $10^{-7} \text{ ms}^{-2} / 10 \text{ } \mu\text{Gal}$) caratterizzato da un alto smorzamento e viene completamente controllato in remoto [*Instruction Manual Underwater Gravity System, 1989*]. Ideato nel 1948, la prima serie ad essere commercializzata fu denominata “W”; questa presentava un problema legato all’effetto del *noise* sismico, in particolare nella componente verticale ed in presenza di bassi fondali. Tale effetto era dovuto principalmente all’azione del moto ondoso e all’assostamento dello strumento su fondali sabbiosi. Il problema fu risolto con la serie “H”, inserendo un alto smorzamento meccanico; lo strumento fu semplificato nel modo di operare e fu inoltre corredato con un nuovo sistema di lettura. Ciò nonostante, necessitava ancora di un cavo con molti conduttori poiché il controllo remoto rimaneva di tipo analogico.

Nel 1986 fu disegnata la serie “U”, della quale fa parte il gravimetro HG-24. Commercializzata nel 1987, rispetto alle serie precedenti implementa una telemetria digitale che ha permesso di ridurre considerevolmente il numero dei conduttori. Il controllo remoto viene effettuato mediante un opportuno software implementato su un PC interfacciato col gravimetro stesso tramite una porta seriale standard (RS232). Infine, il sistema di lettura è stato ulteriormente implementato mediante l’introduzione di una forza elettrostatica calibrata per annullare la posizione della massa.

L’insieme costituito dal sensore gravimetrico, termostato, livelle, *shaft encoder* e alcune schede elettroniche, è racchiuso in una piccola sfera (denominata “*inner sphere*”) che poggia su un supporto autolivellante a sospensione cardanica (*gimbals*), che, attraverso una coppia di motori, permette il livellamento della strumentazione. Ulteriori motori consentono di operare sul sistema di blocco/sblocco della massa e di annullare la sua posizione (lettura gravimetrica).

In origine, il gravimetro era anche dotato di un sensore di pressione (al tempo dell’intervento di seguito descritto non più disponibile), necessario per la misura della profondità. Il sensore era inserito all’esterno della *inner sphere* ma all’interno di una sfera più grande (“*outer sphere*”) che contiene, a sua volta, la *inner sphere* stessa.

Le dimensioni dell’*outer sphere* sono scelte in funzione delle profondità da investigare. Esistono tre tipi di *outer sphere*. Quella attualmente in dotazione al gravimetro HG-24 dell’INGV è la più grande, denominata “*Larger Underwater Sphere*”, costruita in alluminio pesante e utilizzabile per profondità elevate, ovvero fino a 1400 m. Ha un diametro interno di 51 cm, esterno di 65 cm ed è montata su una base triangolare che poggia su tre piedi metallici, ciascuno di lato 1.0 m. L’altezza complessiva è pari a 75 cm.

Per un utilizzo dell’apparato in mare, l’Osservatorio Vesuviano acquisì contestualmente anche un verricello oleodinamico con un cavo della lunghezza di 600 m, a sette conduttori e con doppia guaina di acciaio intrecciato, necessario per il posizionamento, l’alimentazione ed il trasferimento dei segnali. Ciò ha permesso di effettuare misure fino alla batimetrica dei 500 m.

Il gravimetro è stato quindi utilizzato, dal 1987 al 1994, in campagne gravimetriche a mare effettuate nel Golfo di Napoli e alle Isole Eolie [*Berrino, G. et al, 1989; 1998; 2008*], con modalità operative e configurazione analoghe a quelle mostrate in Figura 1.2.

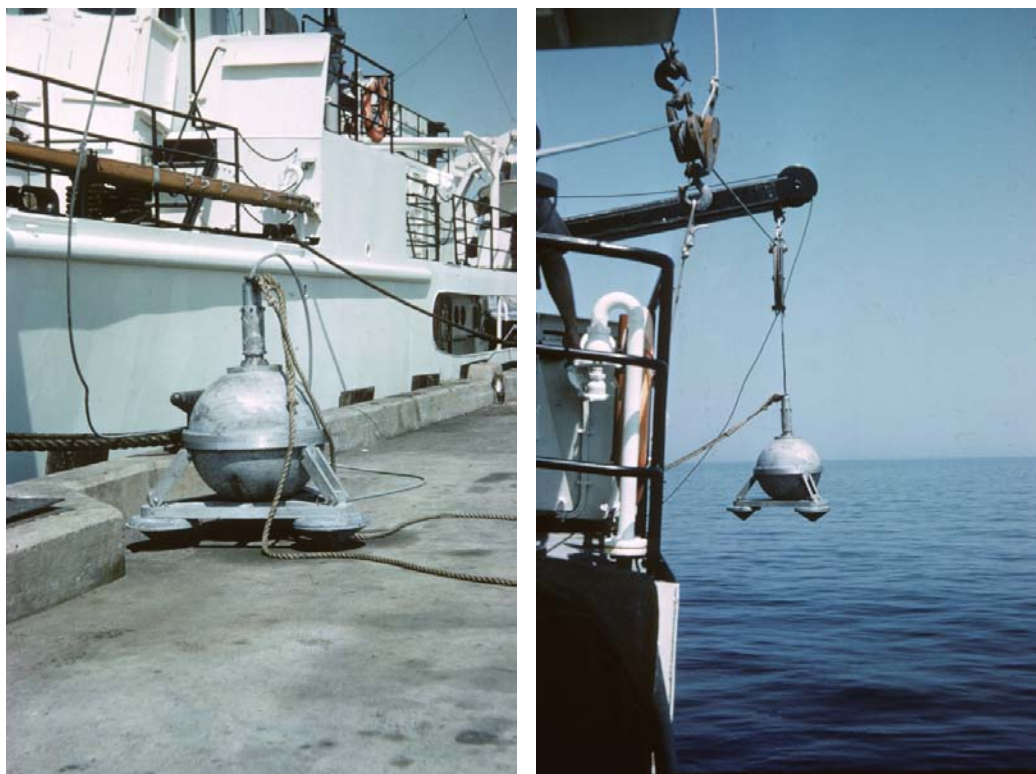


Figura 1.2. Due immagini che ritraggono un esemplare di underwater gravity meter LaCoste&Romberg in uso negli anni 70-80 (foto tratte da NOAA Photo Library).

Nel 1988 la strumentazione fu rimessa alla casa costruttrice essendosi riscontrati alcuni malfunzionamenti nell'hardware ed errori nel software, in particolare relativi alla formula per il calcolo della gravità misurata. Lo strumento fu riconsegnato all'Osservatorio nel 1989 con l'adeguamento dell'hardware e una nuova versione del software, corretto altresì degli errori segnalati e relativi all'elaborazione del segnale gravimetrico (pur se nel manuale permane l'indicazione della procedura errata).

Nel 1994, nel corso dell'ultima crociera gravimetrica, si verificò un guasto al sistema di teletrasmissione dovuta all'interruzione di uno dei 7 conduttori. Il guasto fu riparato con procedure di urgenza da una ditta specializzata presente sul territorio al fine di continuare la campagna di misure; si rese però necessario tagliare il cavo di circa 50 m, riducendolo così agli attuali 550 m. Nel corso della stessa campagna si verificò un ulteriore problema al cavo, con conseguente ingresso di acqua marina, che portò alla definitiva inutilizzazione della strumentazione che non è stata più riparata fino all'*upgrade* del sistema descritto in questo lavoro.

Il gravimetro LaCoste & Romberg (LCR) è un gravimetro relativo che consente la misura della differenza di gravità nello spazio e/o nel tempo. Il suo principio di funzionamento è basato sulla misura dello spostamento di una massa, sospesa ad un sistema elastico, il cui peso varia al variare di g provocando variazioni della lunghezza del sistema elastico stabilizzante [*Instruction Manual model G & D Gravity Meters, 2004*]. La sua struttura è rappresentata in Figura 1.3.

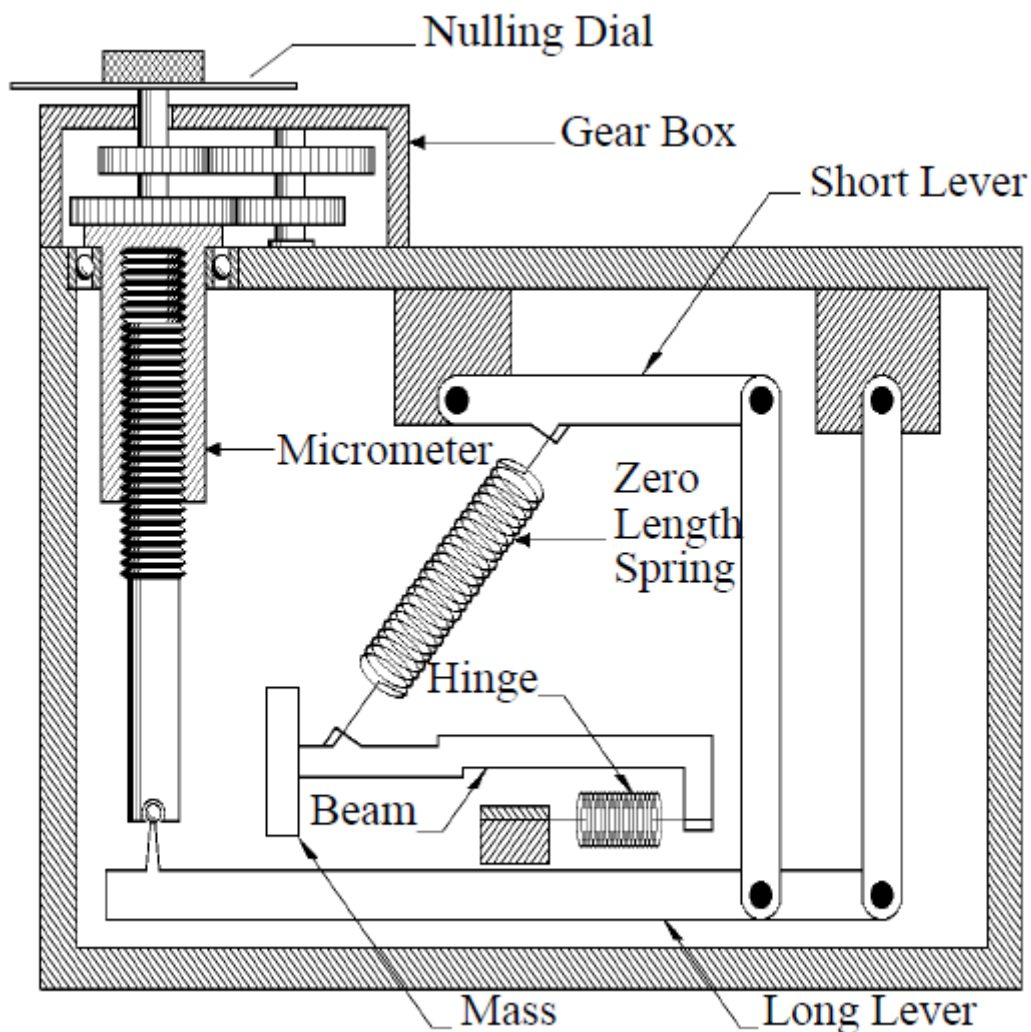


Figura 1.3. Schema del sensore dei gravimetri LaCoste & Romberg, modelli G e D (immagine tratta da Instruction Manual model G & D Gravity Meters, LaCoste & Romberg, Gravity Meters Inc., 2004) - Long Lever – Leva Lunga, Mass – Massa, Hinge – Cerniera, Zero Length Spring – Molla a lunghezza zero, Beam – travetta orizzontale, Micrometer – micrometro, Short Lever - Leva corta, Gear Box – Scatola ingranaggi, Nulling Dial – Disco di annullamento.

In particolare, i gravimetri LCR sono gravimetri astatici, nei quali la molla (*Spring* - il sistema elastico stabilizzante) è fissata rigidamente ad una leva (*Short Lever*) e ad un braccio (*Beam*) alla cui estremità è fissata la massa (*Mass*) che bilancia la forza elastica della molla. La variazione di g , nel tempo e/o nello spazio, provoca uno spostamento della massa con conseguente variazione di lunghezza della molla e di inclinazione del braccio. La molla è detta di lunghezza zero (*Zero Length*) poichè la lettura di g viene effettuata riportando la massa alla posizione originale (definita "zero") mediante lo spostamento del braccio che a sua volta è effettuato tramite una vite micrometrica (*Micrometer*) provvista di quadrante calibrato (o contatore - *Nulling dial*). Il numero di giri del contatore, necessari ad effettuare la compensazione, corrisponde alla differenza di gravità rispetto alla posizione "zero". Ogni singolo strumento è dotato di una tavola di conversione propria, che fornisce la corrispondenza tra numero di giri del contatore e relativo valore di gravità in milliGal. È essenziale che il movimento della massa si effettui lungo la verticale. Importante per il buon funzionamento dello strumento è che questo sia mantenuto ad una temperatura ottimale (circa 50°C).

Nel caso del gravimetro da fondo il numero di giri del contatore viene registrato da un *encoder* digitale e trasformato in valore di gravità. La verticalità è garantita da due anelli cardanici congiunti, alloggiati nella

sfera esterna, sui quali è montata la sfera interna contenente il gravimetro. L'anello più esterno (detto *CROSS Gimbal*) controlla il movimento sul piano perpendicolare al piano di rotazione del *beam*, mentre il più interno (detto *LONG Gimbal*) lavora sul piano parallelo ad esso. Questo sistema permette il livellamento entro i 16 gradi di pendenza.

Il sensore gravimetrico utilizzato nel gravimetro da fondo è, come già detto, il modello G che ha sensibilità di 10^{-7} ms^{-2} , il che consente, nel migliore dei casi e se utilizzato come gravimetro terrestre, di effettuare misure con ripetibilità e precisione dell'ordine delle decine di μGal . Considerate le condizioni ambientali delle misure sul fondo marino, la ripetibilità delle letture e le precisioni attese, che dipendono principalmente dalla profondità e dalla posizione dello strumento, sono dell'ordine di $100 \mu\text{Gal}$ (0.1 mGal) per le misure marine su bassi fondali o di qualche centinaia di μGal (0.2 mGal) per misure a profondità maggiori di 160m.

Il gravimetro da fondo, raffigurato in Figura 1.1, si compone principalmente di tre unità:

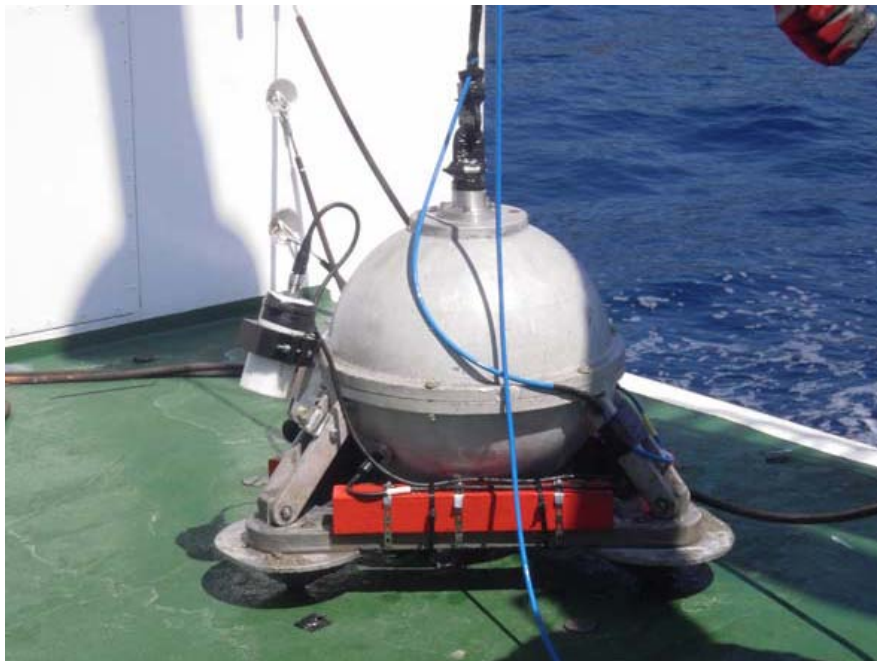


Figura 1.4. Unità subacquea (versione aggiornata).

- l'unità subacquea: raffigurata in Figura 1.4, deve essere considerata come la componente attiva del sistema in quanto include il sensore di misura oltre che il sistema di livellamento motorizzato. Si compone di diverse parti: una batisfera esterna, la struttura sferica interna dentro la quale è alloggiato il gravimetro, il sistema a giroscopi per il livellamento ed il cavo di comunicazione dati. Sulla batisfera esterna è alloggiato un sensore di pressione. Rispetto alla configurazione originale, il profondimetro ed il cavo per la telemetria sono stati modificati.

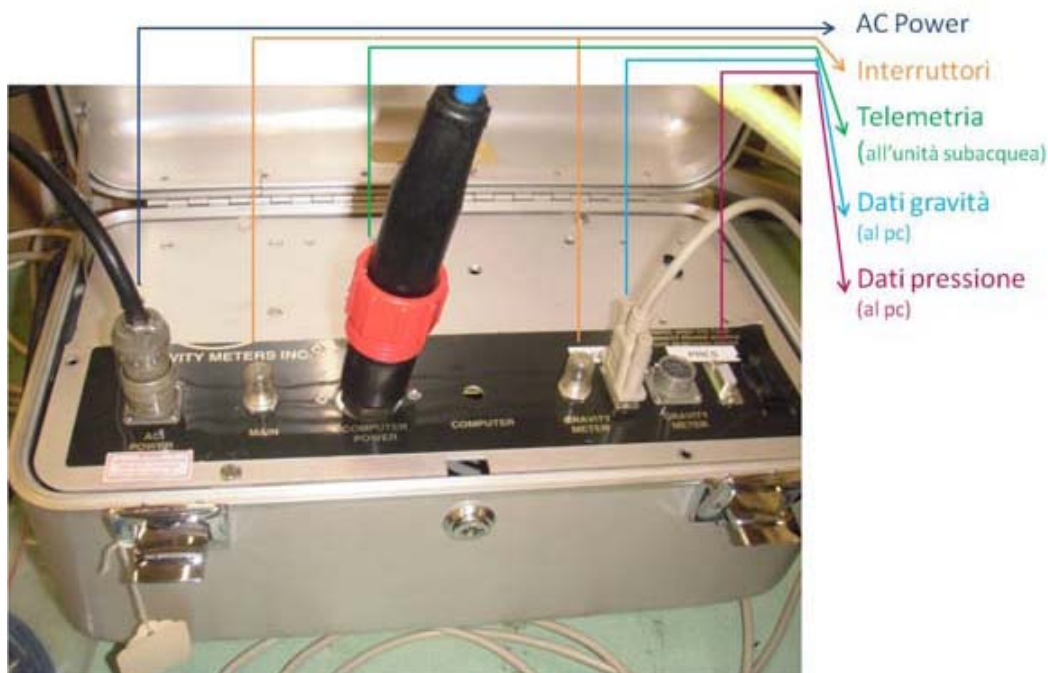


Figura 1.5. Unità di alimentazione e controllo (versione aggiornata).

- unità di controllo ed alimentazione: l'unità funziona in corrente alternata a 230 Volt e ha uno scopo duale: fornire alimentazione al sistema e interpretare i dati di output del gravimetro. All'interno dell'unità di controllo (Figura 1.5) convergono i cavi di alimentazione, il cavo stagno per la telemetria e due cavi di comunicazione seriale per i dati di gravità e di pressione. Anche in questo caso la configurazione originale è stata variata a causa delle modifiche apportate alla componente elettronica del sistema.

```

TELEMETRY
METER 24 TIME 11:57:46 DATE 02/25/110 TIDE -0.0617 DEPTH 386.0
LEVELS CROSS(8350 ) LONG(8250 ) GIMBALS CROSS LONG TEMPERATURE °C
Real Time 8307 360 Tilt 0 3 Meter 26.6
Filtered 8307 360 Position 7514 8439 Ambient 15.9
METER STATUS CHEATER VOLTAGE BEAM POSITION GRAVITY RECORDING
Reading Lamp Off Real Time 367 Real Time 7744 Station Base
Heater Cycle Off Filtered 367 Filtered 7743 Reading 230
Arrestment Clamped
COUNTER 3701.880 SERIAL COMMUNICATIONS
MOTOR STATUS GRAVITY DATA Telemetry Status Stopped
Counter Off C.V. in mGals 0.000 Packets Upbound 1250
Cross Off CTR. in mGals 3751.455 Packet Errors 1
Long Off Gravity 3751.407 Buffered Data 59
Arrestment Off BUFFERED PRINTER DATA 0
COMMAND
Files Telem Unclamp Clamp Gravity Manual Edit Plot Init Run Quit
Initialize Stop
  
```

Figura 1.6. Snapshot del software proprietario LC&R, mentre gira all'interno di un Virtual PC.

- software di gestione dei dati (Figura 1.6): l'unità subacquea è controllata via seriale RS232 utilizzando un software proprietario sviluppato in ambiente MS-DOS, chiamato UGS (*Underwater Gravity System*) mediante il quale è possibile monitorare lo stato del sensore, trasmettere comandi al gravimetro (per esempio *leveling* e *clamp*), visualizzare i dati in uscita e registrarli in formato ASCII.

2. Aggiornamento tecnologico dello strumento

Nella sua configurazione originale (Figure 2.1-2.2-2.3-2.4) lo strumento è gestito per mezzo di cavo elettromeccanico e verricello dedicato. Il cavo originale è un cavo tipico da *downhole logging* (sette conduttori, elettromeccanico, con armatura esterna), opportunamente terminato per connettersi alla sommità della sfera. La telemetria è basata su protocollo RS422, tecnologia che consente trasmissioni seriali bidirezionali su distanze sino a 1.3 km. Nel caso del gravimetro U24, il protocollo nativo è caratterizzato da velocità 2400 baud, 8 bit, No parità, 1 bit di stop; i dati trasmessi sono in formato binario.

Ciò premesso, l'attività di aggiornamento tecnologico dello strumento ha avuto tre obiettivi principali:

- consentirne l'impiego a prescindere dagli originali cavo e verricello dedicati, giudicati non più riutilizzabili salvo onerosi interventi di ripristino;
- risolvere alcuni problemi tecnici riscontrati ed in parte derivanti dalla lunga inattività;
- implementare ulteriori funzionalità quali la possibilità di operare lo strumento come nodo di una rete sottomarina; ciò rende agevole ad esempio il collegamento di ulteriore sensoristica.



Figura 2.1. La batisfera all'arrivo a Tecnomare.



Figura 2.2. Il gravimetro estratto dalla batisfera.



Figura 2.3. Il verricello originale.



Figura 2.4. La terminazione del cavo ombelicale elettromeccanico originale.

Il lavoro di aggiornamento tecnologico, a cura della Tecnomare di Marghera (Venezia), si è svolto secondo i passi descritti nel seguito.

1) Verifica dello stato dello strumento

A seguito dell'arrivo dello strumento e della relativa unità di superficie presso i laboratori Tecnomare, il lavoro è stato organizzato come segue:

- Analisi dello strumento e della documentazione fornita.
- Test dello strumento nelle condizioni operative più simili al suo funzionamento originale (di circa 20 anni precedente).
- Analisi dei problemi occorsi.

Verricello e cavo sono stati lasciati presso INGV/OV in quanto il ripristino della loro funzionalità è stato ritenuto sin da subito tecnicamente ed economicamente non conveniente.

A seguito della lettura dei documenti allegati al gravimetro [*Instruction Manual Underwater Gravity System, ver. 1989*], si è provato a mettere in funzione il gravimetro subacqueo congiuntamente alla sua unità di superficie. Esso è stato utilizzato per l'ultima volta nei primi anni '90, quindi il primo problema da affrontare è stato reperire un PC sufficientemente datato da consentire di farvi girare in maniera affidabile il software di gestione dello strumento. Tale software, denominato UGS-1990 è stato progettato per funzionare in ambiente MS-DOS (probabilmente la versione 6.0 o precedenti) con particolari requisiti di memoria libera. Ovviamente un PC attuale è molto diverso (maggiori risorse hardware, sistemi operativi più nuovi e non del tutto compatibili) rispetto a quelli dell'epoca; dopo molti tentativi, si è riusciti a fare funzionare in maniera stabile l'UGS-1990 su una macchina equipaggiata con Microsoft Windows'95, facendo però effettuare il *boot* direttamente da DOS. In modo del tutto analogo, si è verificato che esso poteva girare parimenti su una macchina virtuale equipaggiata con Windows'95 (ad esempio, utilizzando MS Virtual PC come software di virtualizzazione). Quest'ultima è stata la scelta utilizzata per i test in laboratorio ed in mare: essa ha anche il vantaggio di permettere il funzionamento anche su quei PC non dotati di porta seriale (sostituita con USB e relativo adattatore).

In sintesi, i requisiti di base richiesti al PC per poter far girare il software UGS-1990 sono i seguenti:

- S.O. Windows (suggerito: XP) con virtualizzazione (MS Virtual PC o software analoghi). In alternativa, Windows'95.
- Una porta seriale RS232 per acquisire il solo gravimetro (due se si acquisisce anche il sensore di pressione); vanno bene anche porte seriali ottenute da convertitori USB-RS232 qualora si adotti MS Virtual PC o software similare di virtualizzazione.
- Non vi sono particolari requisiti su RAM / Hard disk, nel senso che qualsiasi PC moderno è dotato delle risorse necessarie a far girare UGS-1990 a patto che l'ambiente MS-DOS sia replicato correttamente. Allo scopo è stato effettuato back-up di una cartella base di installazione per il software.

Una volta avviato UGS-1990, il gravimetro ha cominciato a funzionare. Si sono testate tutte le funzionalità di base. In precedenza si era proceduto all'apertura della batisfera esterna riscontrando i seguenti problemi:

- Un motore di "cross leveling" non funzionava.
- Un fine corsa meccanico era piegato.
- Il sensore di pressione originale, in dotazione alla unità subacquea e acquisito dall'elettronica, era assente. In tal modo il software di acquisizione non può tenere conto di tale parametro in modo affidabile.

Per investigare più a fondo il procedimento di *leveling* dello strumento ed intervenire adeguatamente sui problemi emersi, si è reso necessario aprire anche la sfera interna che contiene il "cuore" del gravimetro stesso. I guasti sono stati riparati (in particolare, un *relay* sostituito); inoltre, per correlare le misure gravimetriche alla profondità, si è deciso di aggiungere al sistema un affidabile sensore di pressione esterno (*Paroscientific modello 8CDP*).

Sulla base di quanto emerso dal lavoro di verifica e analisi, si è potuto quindi procedere con:

- progettazione ed esecuzione dell'*upgrade* della telemetria e del sensore di pressione subacqueo dello strumento;

- progettazione ed esecuzione degli interventi meccanici necessari sulla batisfera dell'unità subacquea del gravimetro;
- test funzionali di laboratorio.

2) Upgrade sottosistema elettronico

A partire da questi interventi, nell'ottica di migliorare la telemetria mantenendo comunque lo strumento compatibile con il passato, la progettazione delle migliorie si è basata sui seguenti passaggi:

- rendere lo strumento operabile per mezzo del medesimo cavo di telemetria (2 conduttori di alimentazione e 2 doppini) già in dotazione di INGV ed impiegato per un modulo strumentato da calata denominato MEDUSA e sviluppato congiuntamente da INGV e Tecnomare;
- sostituire la vecchia telemetria (basata su RS422) con una nuova (basata su Ethernet esteso), doppino lungo;
- adottare un'architettura elettronica tale da rendere lo strumento simile ad un nodo di una LAN Ethernet, consentendo così di aggiungere facilmente altri sensori (inizialmente, un sensore di pressione esterno);
- adozione di connettori sottomarini standard sulla batisfera;
- modifiche dei cablaggi interni alla batisfera e all'unità di superficie, per il collegamento e l'alimentazione della nuova elettronica e del sensore di pressione esterno.

Le modifiche elettroniche per la telemetria sono state effettuate all'interno dell'unità subacquea e simmetricamente, all'interno dell'unità di superficie. In particolare, si è aggiunto al normale funzionamento del dispositivo l'acquisizione di un sensore di pressione esterno che afferisce ad una porta seriale all'uopo predisposta accanto a quella del gravimetro sull'unità di superficie.

La nuova telemetria è basata su:

- Utilizzo di due modem VDSL/Ethernet per consentire l'utilizzo di telemetria su semplice doppino (con banda minima di 1 Mbit/s fino a $L = 1900\text{m}$).
- Impiego di convertitori di protocollo seriale RS232/Ethernet.

I vantaggi rispetto alla telemetria precedente possono essere così riassunti:

- Possibilità di impiegare un cavo subacqueo per la telemetria più lungo, con caratteristiche tecniche facilmente reperibili sul mercato.
- Possibilità di calate a profondità elevata ($> 1000\text{mwd}$), impiegando anche un verricello per il cavo
- Connettori subacquei standard.
- Integrabilità di ulteriori sensori al sistema, senza richiedere onerose modifiche hardware e/o software; in questa prima fase si è collegato un sensore di pressione esterno, ma all'occorrenza sarà possibile anche collegare sensori di natura diversa (quali CTD, ADCP, o altro).

3) Upgrade sottosistema meccanico

Le migliorie di tipo meccanico hanno essenzialmente riguardato la batisfera e sono così riassumibili:

- Modifiche alla semisfera inferiore per consentire il montaggio di due connettori subacquei standard (uno per l'ombelicale, uno per il sensore di pressione esterno).
- Realizzazione di una porta per il test di tenuta della batisfera (assente nell'originale); in questo modo è possibile verificare, prima dell'immersione in acqua, la corretta chiusura della batisfera e l'integrità degli *O-rings*.
- Realizzazione di un supporto per il montaggio di un sensore di pressione esterno.
- Realizzazione di un nuovo occhiello di sollevamento montato in sostituzione dell'originale.

Le Figure 2.5-2.6-2.7-2.8-2.9 mettono a confronto la configurazione originale con quella attuale, ovvero, a seguito delle modifiche apportate.



Figura 2.5. Flangia cieca posta sulla semisfera inferiore (punto di ingresso del cavo ombelicale in una precedente versione dello strumento) prima delle migliorie; qui è stato montato il connettore del nuovo cavo ombelicale.



Figura 2.6. Vista della porta del sensore di pressione originale e relativa modifica.



Figura 2.7. Vista della semisfera inferiore prima e dopo le migliorie; all'interno sono ben visibili a) la manichetta nera del sensore di pressione originariamente utilizzato (montato internamente); b) il water detector (al centro, con i cavi di collegamento rossi); c) i tre supporti per il montaggio del gravimetro.

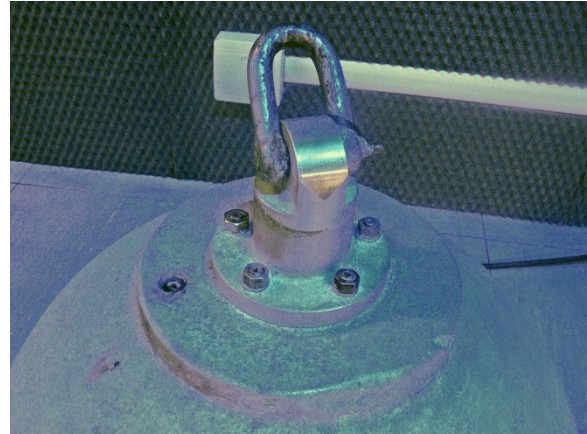


Figura. 2.8. L'allestimento originale del sistema di connessione meccanica ed elettrica e modifica.



Figura 2.9. Particolare del connettore elettrico originale (7 pin).

3. Test di laboratorio

L'attività di acquisizione in mare è stata preceduta da una fase propedeutica di test di laboratorio tramite la quale è stato possibile verificare lo stato di funzionamento del gravimetro in relazione alle recenti modifiche apportate alla componente elettronica. Il test di verifica delle funzionalità del gravimetro si è svolto presso il laboratorio della sede di Porto Venere dell'INGV.

Il gravimetro è stato alloggiato in un ambiente caratterizzato da basso rumore antropico, lasciandolo in registrazione continua per sessioni della durata di 40-70 ore. Ciò al fine di valutare la risposta dello strumento alle variazioni mareali di g , la sua deriva strumentale e soprattutto la risposta al disturbo ambientale.

Di seguito (Figure 3.1 e 3.2) si riportano i grafici relativi a due serie di misure, effettuate rispettivamente dal 2 al 5 Luglio 2010, per un totale di 63 ore, e dal 12 al 14 Luglio 2010, per un totale di 43 ore. Per ogni serie sono riportati 4 grafici, che raffigurano rispettivamente i seguenti andamenti:

- *raw data*, ovvero i dati di uscita del gravimetro;
- *filtered raw data*: dati corretti da *spike* e dal *noise* ambientale;
- *tide*: variazione di marea;
- *tide corrected gravity*: dati di gravità filtrati e corretti dall'effetto di marea.

2-5 luglio. Durata: 69 ore

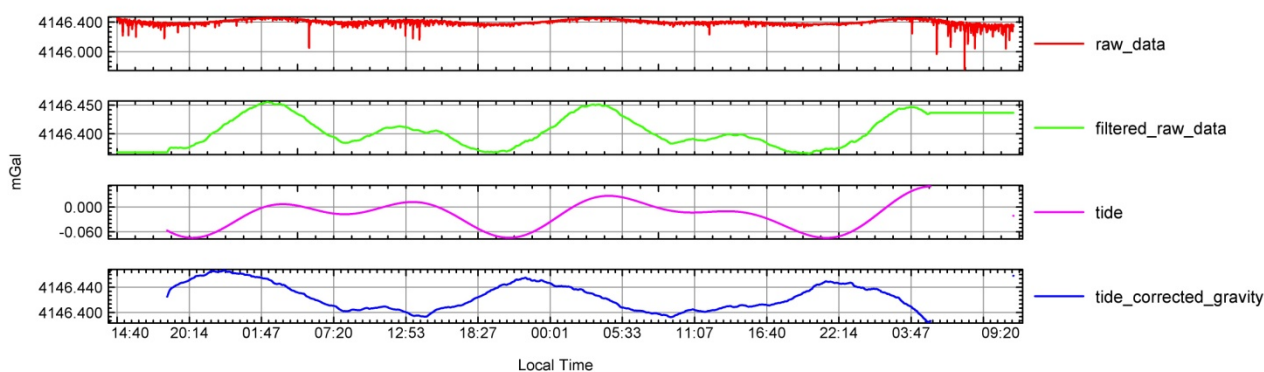


Figura 3.1. Dati relativi all'acquisizione nei giorni 2-5 Luglio 2010. Lo scarto tra i valori massimi e minimi tra le quattro serie è, in ordine: raw data: 0,697 mGal; filtered data: 0,090 mGal; tide: 0,125 mGal; tide corrected data: 0,082 mGal.

12-14 luglio. Durata: 43 ore

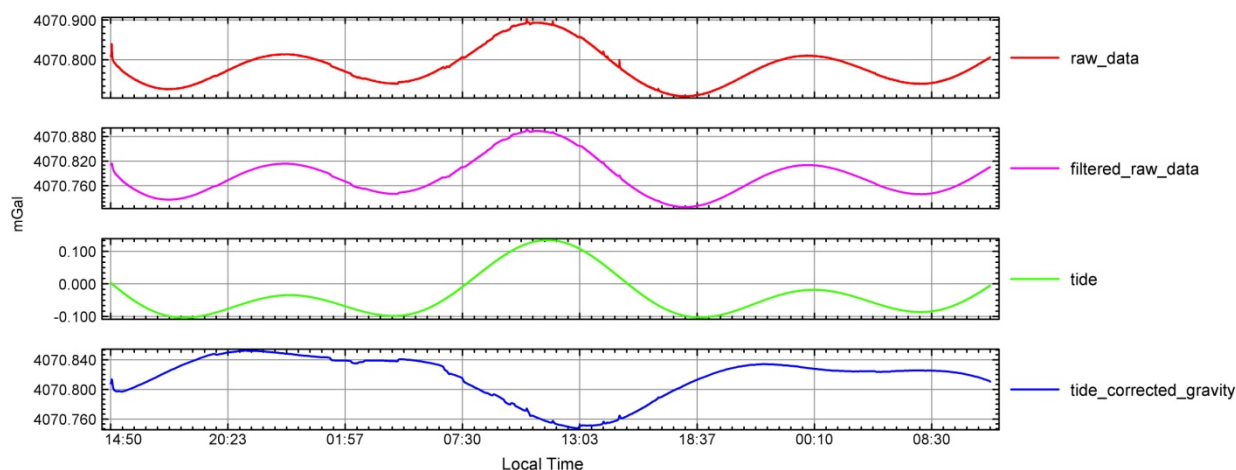


Figura 3.2. Dati relativi all'acquisizione nei giorni 12-14 Luglio 2010. Lo scarto tra i valori massimi e minimi tra le quattro serie è, in ordine: raw data: 0,196 mGal; filtered data: 0,189 mGal; tide: 0,238 mGal; tide corrected data: 0,105 mGal.

I valori registrati di g (*raw_data*) mostrano innanzitutto un'ottima risposta sia all'effetto mareale, sia al disturbo locale indicando un buon funzionamento dello strumento. In prima analisi, sono stati eliminati, mediante filtraggio, gli *spike* presenti sulla registrazione e associabili al disturbo ambientale; ciò per meglio evidenziare la risposta mareale e la deriva dello strumento.

I dati così puliti (*filtered_raw_data*) sono stati poi depurati dell'effetto di marea (*tide*) calcolato mediante l'algoritmo di Longman [Longman, I.M., 1959] accettabile in fase di test.

I valori corretti di marea (*tide_corrected_gravity*) mostrano innanzitutto che in stazione fissa e su periodi dell'ordine dei giorni la deriva strumentale è praticamente nulla, mentre permane evidente un forte residuo mareale, talvolta sfasato nel tempo, ascrivibile al fatto che lo strumento non è corredato da sistema di retroazione specifico (*feedback*), per rendere un gravimetro meccanico idoneo alla registrazione, oltre che ad una non perfetta sincronizzazione dell'orologio del PC.

Ad ogni modo, l'analisi di queste serie di dati ha permesso di valutare un'ottima funzionalità dello strumento e la possibilità di un suo impiego in attività di acquisizione in mare.

4. Test gravimetrici di fondo mare

Lo scopo dei test in mare, effettuati durante la campagna del Luglio 2010, è stato quello di validare l'operatività in mare dello strumento appena revisionato in vista di possibili applicazioni future. Le misure gravimetriche marine di fondo rientrano infatti nelle specifiche tecniche del progetto di ricerca InSAS che vede come partner eni Spa, Tecnomare SpA, NURC, INGV e Politecnico di Milano. La finalità del progetto è la valutazione dei fenomeni di deformazione del fondale marino tramite tecniche sonar InSAS. In questo contesto le misure gravimetriche di fondo devono essere considerate come complementari a quelle interferometriche in quanto possono fornire un'ulteriore indicazione quantitativa sulle variazioni batimetriche su piccola scala.

Operazioni preparatorie alla campagna

Prima della partenza per la missione in nave, lo strumento è stato portato presso la sede del NURC, base di partenza della nave, ed è stato sottoposto al *lifting test* da parte di un'azienda di certificazione.

È stato inoltre stilato il documento SOP (*Standard Operational Procedure*) nel quale sono state riassunte le specifiche tecniche dello strumento e le operazioni di gestione dello stesso durante la fase di acquisizione in mare. Successivamente, il gravimetro è stato allestito e posizionato in prossimità della banchina di attracco della CRV Leonardo e fatto acquisire per circa 30 min in modo da avere un riferimento gravimetrico a terra. La stazione di riferimento a terra, posizionata sul molo di attracco della nave, è stata denominata "Molo NURC" ed in essa è stato riportato il valore assoluto di g mediante un 'trasporto di gravità' per collegamento alla stazione assoluta *International Gravimetric Bureau, Coastal Gravimetric Station*: BGI n. 101030. Il trasporto è stato effettuato con un gravimetro terrestre LCR modello G n. 170. La valutazione della gravità assoluta alla stazione di riferimento permette di correlare tutti i dati acquisiti in mare e poter applicare le successive correzioni gravimetriche standard. In tabella 4.1 vengono riassunte le caratteristiche della stazione di riferimento.

Stazione	Latitudine (deg)	Longitudine (deg)	Gravità assoluta (mGal)	Lettura (mGal)
Molo Nurc	44.0955	9.86500	980551.675	4069.839

Tabella 4.1. Posizione geografica e valori di gravità della stazione di riferimento molo NURC.

Operazioni di messa a mare

Durante il primo giorno di missione sono state definite, d'intesa con il comando del CRV Leonardo, le modalità di messa a mare e di utilizzo del gravimetro.

Per la calata è stato usato il portale di poppa (Figura.4.1) e, attraverso un verricello, è stato filato il cavo meccanico in kevlar (80 metri) al quale è stato legato, progressivamente durante la calata, il cavo per la telemetria.



Figura 4.1. Messa a mare dell'unità subacquea dal portale di poppa.

Per la messa a mare è stata usata la tecnica di 'zavorra prima', secondo lo schema riprodotto in Figura 4.2: una prima boa è stata assicurata al cavo ad una distanza di circa 10 metri dal gravimetro, con la funzione di tenere in leggera tensione il cavo e non permettergli di creare volte.

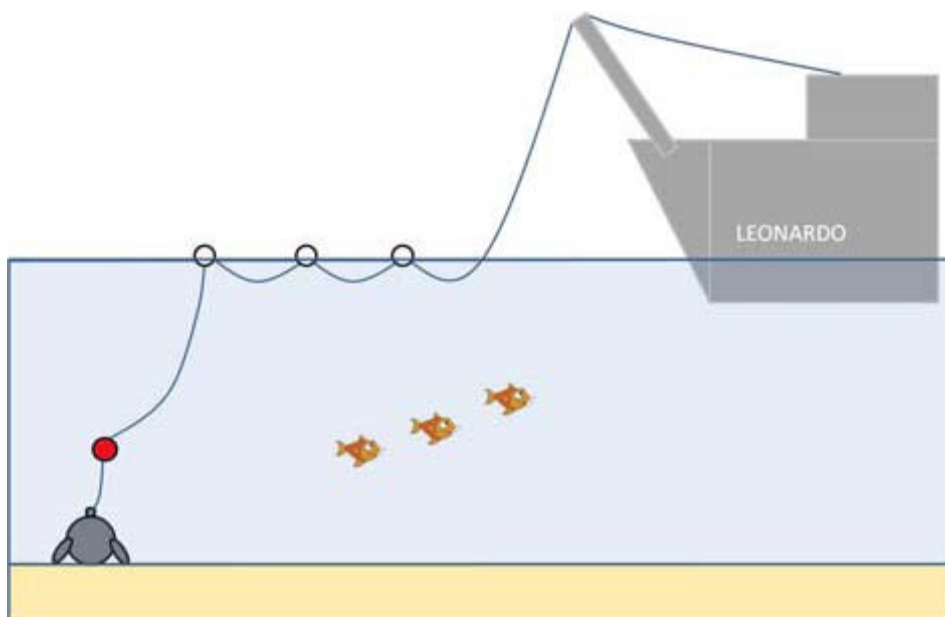


Figura 4.2. Schema di mooring del gravimetro.

Tre boe, in breve successione, sono state poi assicurate al cavo immediatamente in seguito all'impatto del gravimetro sul fondo del mare (Figura 4.3). In questo modo era possibile anche conoscere con immediatezza la posizione del gravimetro sul fondo. La posizione esatta dell'unità subacquea è stata ottenuta utilizzando un transponder acustico HiPAP vincolato alla base del gravimetro. Le profondità dei punti stazione sono state calcolate mediante i valori di pressione forniti dal pressostato *Paroscientific modello 8CDP* allestito sulla batisfera. Una discussione dettagliata sul calcolo della profondità è data di seguito.

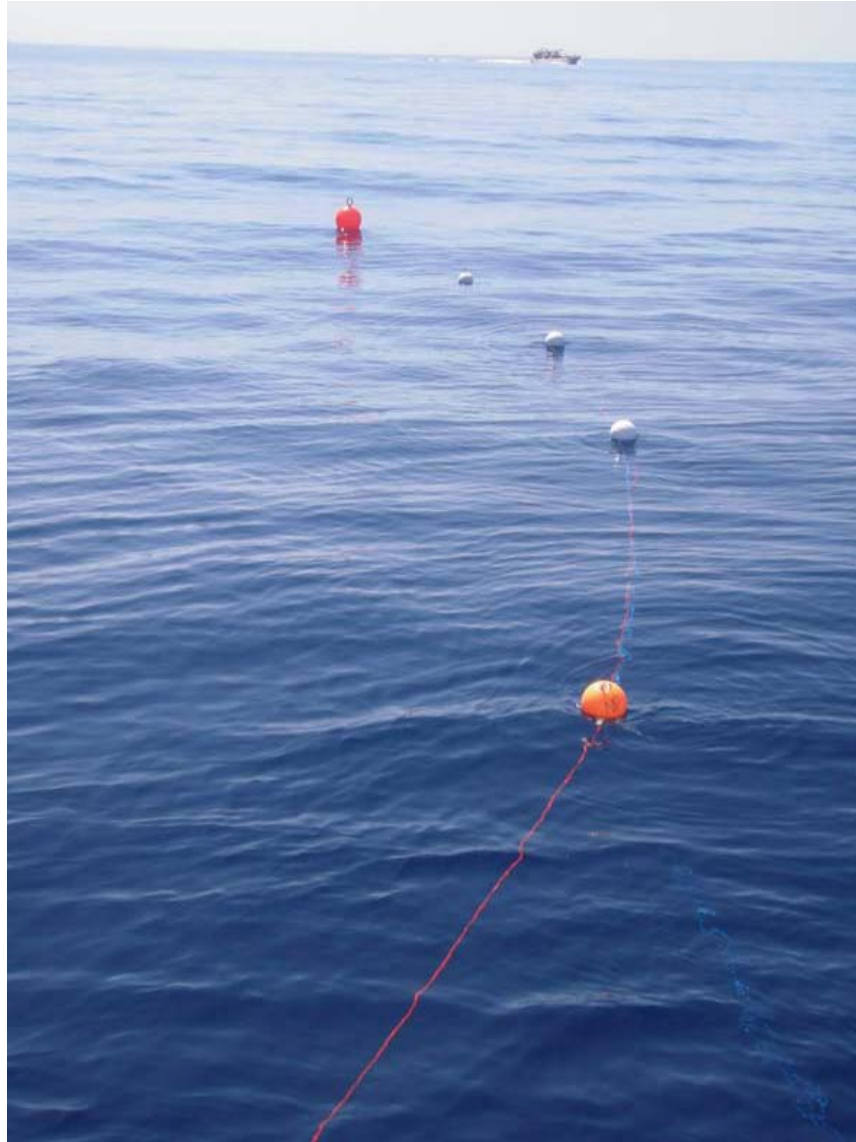


Figura 4.3. Mooring del gravimetro visto da poppa della nave.

In ogni punto di misura (nel seguito 'stazione'), la sessione di misura è durata circa 30 minuti; ciò è stato possibile grazie al posizionamento dinamico di cui è dotata la nave.

Per il trasporto da una stazione all'altra, il gravimetro è stato sollevato dal fondale di circa 10 metri e trainato a bassa velocità fino al successivo punto di misura.

In Figura 4.4 sono riportati i punti in cui sono stati registrati dati nei due giorni di missione.

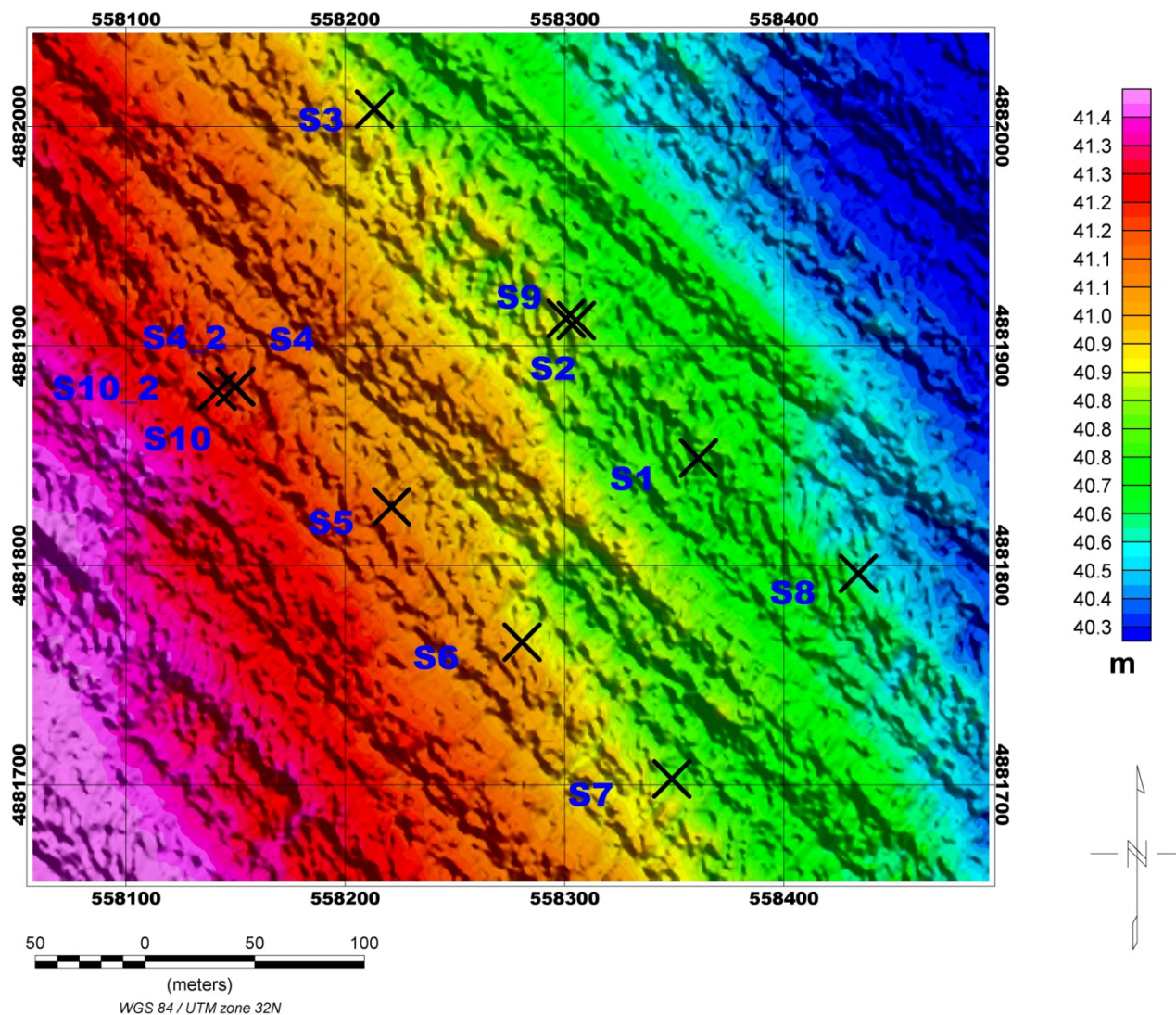


Figura 4.4. Batimetria dell'area di studio e stazioni di misura.

Stazione	Longitudine (deg)	Latitudine (deg)
s1	9.729000	44.087493
s2	9.728312	44.088062
s9	9.728253	44.088070
s3	9.727173	44.088937
s4	9.726365	44.087802
s4_2	9.726368	44.087803
s10_2	9.726263	44.087785
s5	9.727250	44.087305
s6	9.727987	44.086745
s7	9.728832	44.086178
s8	9.729905	44.087013

Tabella 4.2. Posizione geografica delle stazioni acquisite durante la campagna di misure.

Acquisizione dei dati di gravità

Durante la campagna di misure, svolta nei giorni 20 e 21 Luglio 2010 a largo di Riomaggiore (SP), sono state acquisite 12 serie di misura su 8 stazioni, 2 delle quali, la s2 e la s4, sono state ribattute e rispettivamente rinumerate s9 (per la s2) e s4_2, s10 e s10_2 (per la s4). La s10 non viene riportata in tabella perché ricalca esattamente la s10_2. In Figura 4.4 vengono riportati la posizione ed il numero identificativo di stazione.

Per ogni singola stazione, l'acquisizione è durata in media 15 minuti con una frequenza di campionamento dati di 1 Hz.

I dati sono stati analizzati attraverso il programma *Oasis Montaj*, e le registrazioni ottenute sono riportate nella serie di Figura 4.5.

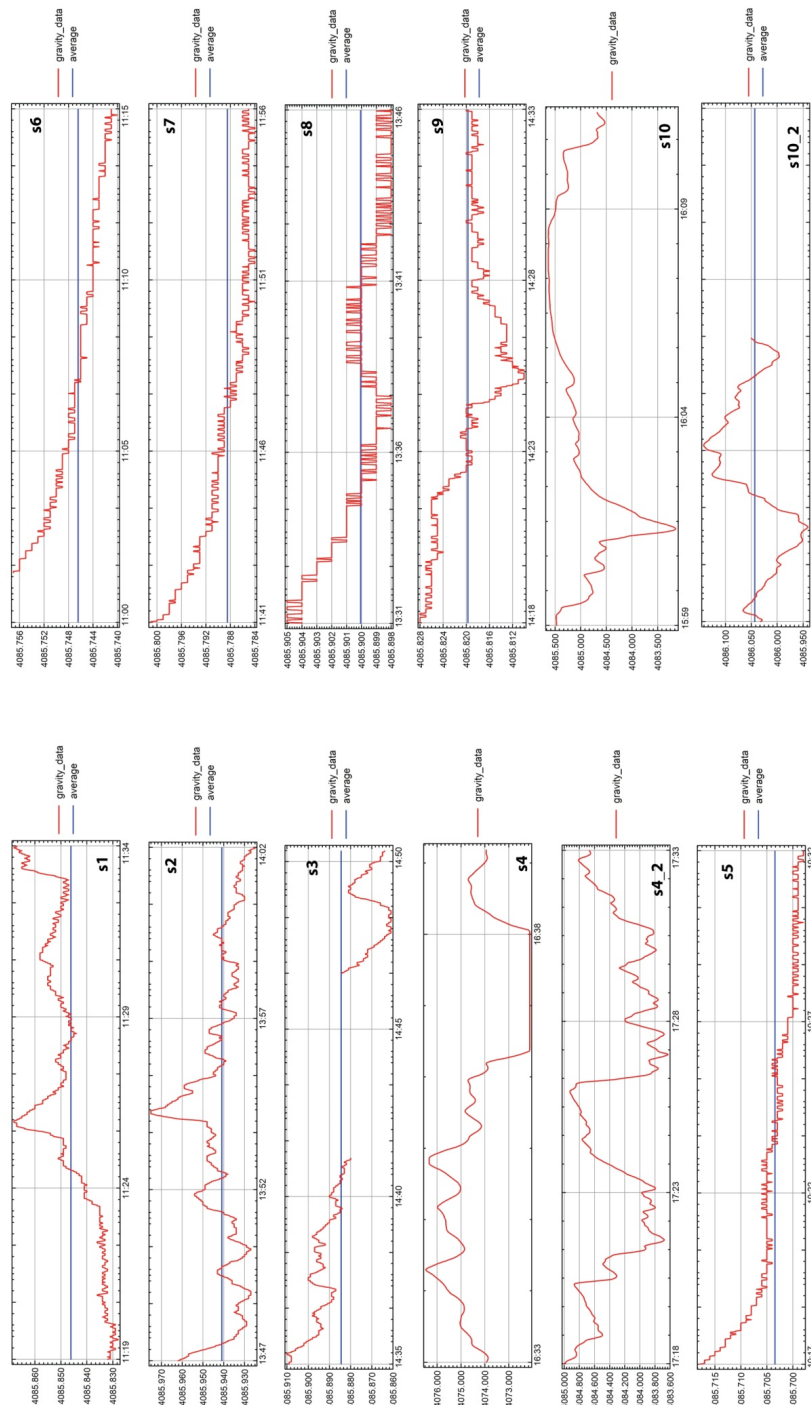


Figura 4.5. Profili delle 12 letture (otto stazioni e 4 ribattute) acquisite durante il rilievo a mare inSAS. In rosso si riporta il valore in mGal della gravità misurata dal gravimetro, in blu il valore medio (mGal). Le posizioni geografiche delle stazioni di misura sono riportate in tabella 4.2.

Osservando i grafici dell'andamento della lettura gravimetrica nelle singole stazioni si evince che l'intervallo di variazione è contenuto entro ± 0.1 mGal (100 μ Gal) ed in alcuni casi non supera i 10-15 μ Gal; ciò è indicativo di un'ottima qualità dei dati acquisiti.

La ripetizione della misura alla stazione 2, identificata con il numero s9, ha permesso di valutare una differenza media di circa 145 μ Gal. Questo valore, considerato anche l'errore di posizionamento commesso, è in ottimo accordo con i valori di ripetibilità della misura prima dichiarati ed è indicativo di un buon funzionamento dello strumento.

In via generale, durante la fase di acquisizione, non si sono riscontrati problemi di sorta ad eccezione della stazione numero 4 dove è stata valutata una forte instabilità del gravimetro in fase di misura (scivolamento ed inclinazione della piattaforma sul fondale marino) strettamente correlata alle caratteristiche del sito. Nonostante siano state tentate su questa stazione quattro diverse acquisizioni durante i due giorni di missione, ed in diversi momenti della giornata, il problema di instabilità è perdurato; solo la rimisura nella stazione s10_2 e limitatamente ai primi 8 minuti di registrazione ha fornito risultati accettabili.

L'attività operativa di acquisizione gravimetrica si è conclusa il giorno 22 Luglio con la ripetizione della misura alla stazione di riferimento a terra (molo NURC) in modo da poter valutare la deriva strumentale. Il valore medio della misura di chiusura in banchina è 4070.405 che fornisce un valore di deriva giornaliera di 141 μ Gal/giorno. Quest'ultimo verrà utilizzato per correggere le stazioni gravimetriche a mare dall'errore di deriva strumentale.

Acquisizione dei dati di pressione

Contestualmente all'acquisizione dei dati di gravità sono stati registrati anche i valori di pressione forniti dal pressostato allestito ad *hoc* sulla batisfera dell'unità subacquea del gravimetro (Figura 1.4). L'aggiornamento tecnologico sviluppato da Tecnomare ha reso possibile utilizzare lo stesso cavo telemetrico del gravimetro per trasferire anche i dati di pressione. I valori di pressione acquisiti durante ogni registrazione sono stati mediati e successivamente convertiti in un valore di profondità utilizzando la seguente relazione:

$$z_{press}[m] \approx \frac{p_z[mbar] - p_{l.m.}[mbar]}{100}$$

nella quale, z_{press} è la profondità espressa in metri e calcolata dai dati di pressione, p_z è la pressione espressa in hPa misurata dal profondimetro e $p_{l.m.}$ quella misurata a livello del mare.

I valori calcolati sono riportati in tabella 4.2, utilizzando come valore di pressione al livello del mare 1013.390 hPa.

Stazione	Pressione media (hPa)	Profondità (m)
s1	1510.663	40.932
s2	1512.031	41.069
s3	-	-
s4	1516.519	41.518
s4_2	1520.238	41.890
s5	1514.567	41.323
s6	1513.410	41.207
s7	1512.357	41.102
s8	1509.653	40.831
s9	1512.064	41.073
s10	1512.959	41.162
s10_2	1517.191	41.585

Tabella 4.2. Per ogni stazione è indicato: il valore di pressione in hPa, media dell'acquisizione nel tempo, ed il valore di profondità calcolato.

Nel caso della stazione 3 è stato riscontrato un problema nel salvataggio del dato, che comunque non si è riproposto nelle successive misure. I valori di profondità calcolati dalla lettura del pressostato sono stati poi messi a confronto con quelli provenienti dal trasduttore acustico e con i dati batimetrici esistenti con un dettaglio di 2m.

In tabella 4.3 è riportato il confronto dei tre valori per le singole stazioni.

Nell'analisi dei valori riportati bisogna tenere conto del fatto che i valori di profondità si riferiscono a tre livelli diversi: la batimetria al livello del fondo, il trasponder acustico al livello di circa 30 cm dal fondo ed il profundimetro poco sopra quest'ultimo.

Stazione	Trasponder acustico (m)	Sensore di Pressione (m)	Batimetria (m)
s1	41.686	40.932	40.794
s2	41.564	41.069	40.833
s3	41.643	--	40.867
s4	42.231	41.518	41.196
s4_2	42.630	41.890	41.196
s5	41.867	41.323	41.025
s6	42.181	41.207	40.939
s7	41.978	41.102	40.802
s8	42.001	40.831	40.595
s9	41.67	41.073	40.835
s10	42.35	41.162	41.196
s10_2	42.37	41.585	41.202

Tabella 4.3. Valore della profondità rilevato su ciascuna stazione rispettivamente dal trasduttore, dal sensore di pressione e dalla batimetria. I dati relativi alla batimetria sono stati ottenuti per interpolazione.

Il confronto tra i diversi valori è rappresentato anche nella Figura 4.17.

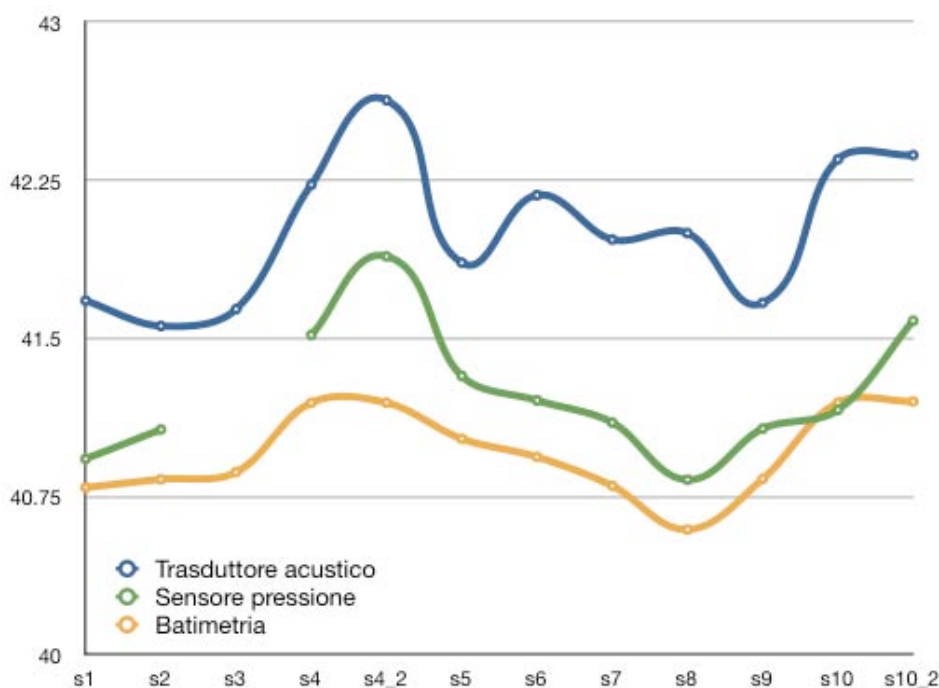


Figura 4.17. Andamento nelle diverse stazioni della profondità rilevata attraverso i tre metodi: trasponder acustico (curva in blu); sensore di pressione (curva in arancio); interpolazione della batimetria (curva in verde). Ai fini della successiva fase di elaborazione dei dati di gravità è stato utilizzato il valore di profondità fornito dal trasponder acustico.

Elaborazione dei dati gravimetrici

I *dataset* registrati durante la campagna a mare sono stati analizzati statisticamente in modo da ottenere univoci valori di gravità rappresentativi delle 8 stazioni di misura. Successivamente sono state applicate correzioni standard per ottenere valori di anomalia di *free-water* e di Bouguer.

Vediamo innanzitutto l'esito di una analisi statistica. Per ogni stazione di misura, l'acquisizione è durata circa 15 minuti con un campionamento di 1 dato di gravità al secondo. Il gravimetro fornisce, in fase di output, il valore di gravità corretto dagli effetti di marea (*Tide*) oltre a quello non corretto e le informazioni geografiche e temporali dell'acquisizione.

Riportando su un grafico l'andamento della gravità corretta dall'effetto di marea in funzione del tempo si può osservare un *trend* di variazione gravimetrica non ascrivibile agli effetti mareali ma correlato alla stabilità della strumentazione sul fondo. Per questo motivo è indispensabile valutare la variazione della misura nel tempo per via statistica e mediare il set di dati ottenendo un singolo valore di gravità (valor medio). In Figura 4.18 si riporta il profilo di gravità della stazione 8 con il relativo andamento, le differenze tra le singole letture e il valor medio. In diversi casi, si sono registrati *pattern* di variazioni errati causati dall'instabilità del gravimetro sul fondo che sono stati rimossi dal *dataset* per non inficiare la successiva analisi statistica (vedi per esempio Figura 4.19). Il risultato dell'analisi statistica è riassunta in tabella 4.4 dove sono riportati i valori di gravità mediati per le 8 stazioni in esame.

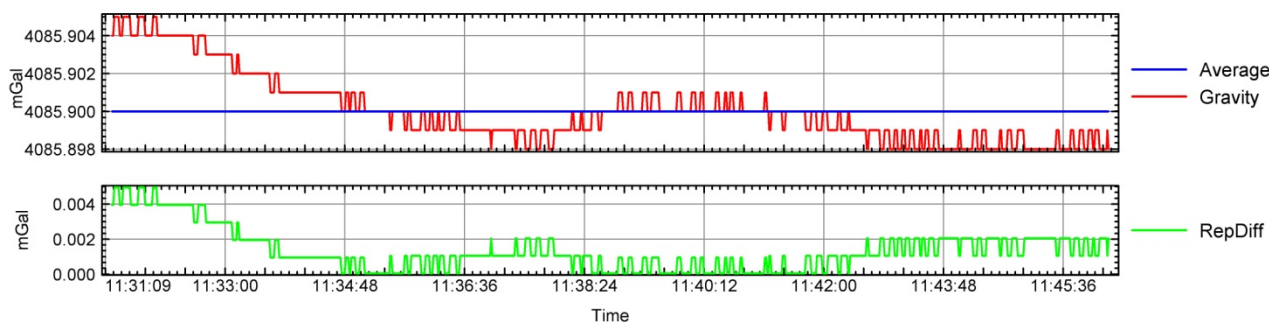


Figura 4.18. Valore di gravità osservata nella stazione 8 in rosso: la linea blu nel plot rappresenta il valore medio; in verde sono riportate le differenze tra le singole letture e il valor medio.

Le successive analisi e correzioni sono state applicate a questo *dataset* di valori gravimetrici medi.

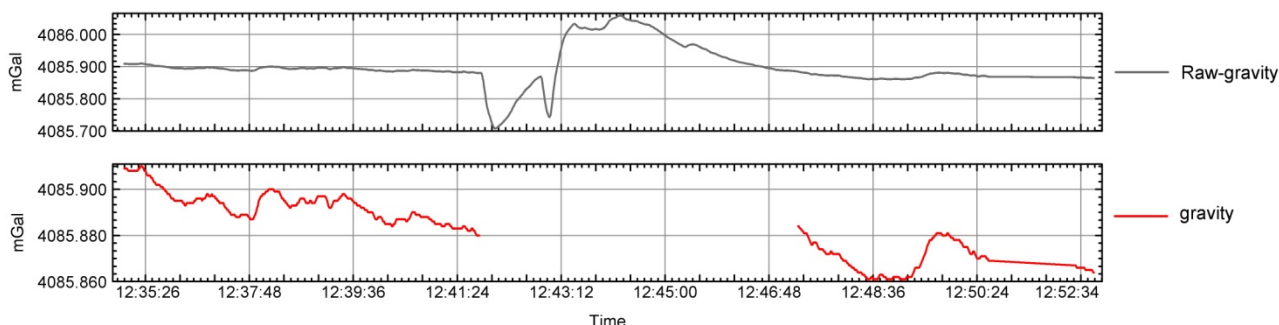


Figura 4.19. Stazione 3. Nel grafico di sopra sono riportati i dati originali dell'acquisizione, in quello sotto i dati sono stati modificati rimuovendo le parti statisticamente non significative.

Valore di gravità assoluta e calcolo delle anomalie gravimetriche

Il gravimetro utilizzato nella campagna a mare è, come già detto in precedenza, uno strumento relativo che consente la misura della differenza di gravità tra punti. Ai fini della prospezione geofisica, come nel nostro caso, e nelle sue applicazioni più generali finalizzate alla definizione delle anomalie di gravità, il dato gravimetrico relativo potrebbe non essere esaustivo, poiché esso deve poi essere confrontato con un valore teorico calcolato su una superficie di riferimento. Nella maggior parte dei casi, nei quali rientra il nostro, il valore teorico è quello calcolato sull'ellissoide di riferimento ed è il valore dell'accelerazione di g . È necessario perciò conoscere su ciascuna stazione il corrispondente valore assoluto di g , che si ottiene tramite i collegamenti effettuati con la stazione di riferimento, nel nostro caso la stazione "molo NURC", applicando la relazione.

$$G_{abs-s} = (r_s - r_b) + G_{abs-b},$$

dove G_{abs-s} è il valore di gravità assoluta della stazione di misura a mare, r_s e r_b sono rispettivamente le letture gravimetriche della stazione di misura e della base di riferimento e G_{abs-b} è il valore di gravità assoluto della stazione base. La gravità, non considerando le variazioni di origine mareale, dipende localmente da differenti fattori come la latitudine geografica, la quota e la distribuzione delle masse. La variazione di gravità in funzione della latitudine, conosciuta come gravità teorica o normale, viene calcolata mediante una formula che tiene conto dei parametri geometrici caratteristici dell'ellissoide scelto come riferimento. Tale valore è quello che, come detto precedentemente, ci permetterà di definire le anomalie gravimetriche dopo essere stato sottratto dal valore di gravità assoluta osservato nelle singole stazioni. Nel caso in oggetto, è stata utilizzata la formula della gravità teorica GRS80 (WGS-84) [Moritz, 1984]:

$$g_0 = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 \Phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi}},$$

dove

$$k = 0.001\ 931\ 851\ 353$$

$$\gamma_e = 9.780\ 326\ 7715\ \text{ms}^{-2}$$

$$e^2 = 0.006\ 694\ 380\ 022\ 90$$

e dove Φ è la latitudine geografica.

Anomalie gravimetriche: *free-water* e Bouguer

Poiché la misura di gravità dipende anche della quota (o profondità), solamente le misure di gravità acquisite a livello del mare possono essere direttamente paragonate alla gravità normale.

Nel caso di misure gravimetriche fatte a terra o sul fondale marino bisogna tenere conto dell'effetto di altitudine. Nel caso di un rilievo gravimetrico di fondo il contributo di acqua libera detto anche *free-water* [Hildebrand, J.A, et al, 1990] si ottiene applicando al seguente relazione:

$$g_{fw} = 0.222 * h,$$

dove g_{fw} (in mGal) è la correzione di *free-water* e h è la profondità (in metri). 0.222 è il gradiente di gravità in acqua libera (mGal/m - analogo al gradiente di aria libera per i rilievi terrestri).

L'anomalia di *free-water* è data da:

$$\Delta g_{fw} = g_{abs-s} - g_0 - g_{fw}$$

La correzione di *free-Water* tiene conto solamente della distanza esistente tra il punto di osservazione ed il geode senza considerare l'effetto connesso alle masse interposte tra i due punti. Quest'ultimo contributo si può calcolare applicando la correzione di Bouguer. In particolare la correzione semplice di Bouguer approssima le masse comprese tra il livello del mare e il punto sul fondale marino con una piastra infinitamente estesa di densità unitaria ρ_s .

L'equazione della 'correzione di piastra' è:

$$g_{sb} = 0.04191 \cdot \rho_s \cdot h_s$$

dove h è la profondità (in metri) e ρ_s è la densità di riduzione di Bouguer; nel caso di rilevamenti gravimetrici di fondo il valore di ρ_s è pari alla differenza tra il valore di densità medio della crosta e quello dell'acqua di mare (1030 kg/m^3).

Il valore di anomalia semplice di Bouguer (*simple Bouguer anomaly*) si ottiene da:

$$\Delta g_{sb} = g_{abs-s} - g_0 - g_{fa} - g_{sb}$$

L'anomalia di Bouguer fornisce informazioni sulla discrepanza locale di densità rispetto al valore di riferimento scelto per la correzione. Nel caso specifico, abbiamo scelto come valore di densità di riferimento per la porzione crostale dell'area in oggetto il valore di 2670 kg/m^3 . La tabella 4.4 riassume tutte le correzioni effettuate per le 8 stazioni gravimetriche acquisite durante la campagna a mare.

Staz	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Prof. (m)	Letture (mGal)	Grav. Ass. (mGal)	Gravità Teorica	Free Water	Bouguer
s1	9.729000	44.087493	41.68	4085.67	980567.50	980536.479	21.77	18.91
s2	9.728312	44.088062	41.56	4085.74	980567.57	980536.530	21.82	18.96
s3	9.727173	44.088937	41.64	4085.67	980567.51	980536.609	21.65	18.79
s5	9.727250	44.087305	41.86	4085.45	980567.29	980536.462	21.53	18.65
s6	9.727987	44.086745	42.18	4085.49	980567.32	980536.411	21.55	18.65
s7	9.728832	44.086178	41.97	4085.52	980567.36	980536.360	21.68	18.80
s8	9.729905	44.087013	42.00	4085.61	980567.45	980536.435	21.69	18.80
s9	9.728253	44.088070	41.67	4085.53	980567.36	980536.531	21.58	18.72
s10_2	9.726263	44.087785	42.37	4085.73	980567.56	980536.505	21.65	18.74

Tabella 4.4. Tabella riassuntiva dei valori di gravità delle 8 stazioni misurate ritenute significative; si ricorda che la stazione 9 è la ribattitura della stazione 2. I valori di anomalia di Bouguer e di free-water sono espressi in mGal.

5. Conclusioni

Sia dai risultati di laboratorio che dai test effettuati in mare, il *Refurbishment* effettuato all'apparato risulta assai funzionale ed efficace. In particolare, durante la campagna gravimetrica marina *InSAS sea Trial July 2010* è stato possibile acquisire 8 stazioni gravimetriche di fondo nell'Area Marina Protetta del Parco Nazionale delle Cinque Terre. L'Analisi statistica e le successive correzioni hanno evidenziato la buona qualità dei dati acquisiti resa possibile, oltre che dalla bontà degli interventi di aggiornamento del gravimetro da fondo utilizzato, anche dall'impiego di un vettore marino idoneo per questo tipo di attività. I dati acquisiti sono stati elaborati secondo le tecniche standard ottenendo un set di 8 valori di gravità assoluta ed i correlati valori di anomalia di *free-water* e Bouguer (ridotta a 2670 kg/m³).

Durante la fase di acquisizione sono state definite alcune procedure operative utili come linee guida per le prossime campagne:

- il software di gestione del gravimetro deve essere interfacciato ad un personal computer provvisto di emulatore MS-DOS;
- il sistema gravimetrico risente molto della tipologia del fondale marino e una posizione errata può provocare una instabilità della misura;
- la bontà della misura in fase di acquisizione a mare è strettamente legata al movimento della nave e/o eventuale sollecitazione del cavo di traino. È sempre conveniente operare con vettori marini provvisti di 'posizionamento dinamico';
- il periodo di acquisizione medio per stazione si aggira a circa 1 ora tenendo conto delle fasi di messa a mare, acquisizione e recupero.
-

Al fine di un ottimale utilizzo del gravimetro anche in installazioni in fondo al mare di lungo periodo, si prevede quanto prima di effettuare un ulteriore aggiornamento del sistema, ovvero l'installazione di un sistema di feedback.

Bibliografia

- Berrino G., Corrado G., Lo Bascio A., Luongo G., Scotti A., (1989). Gravimetria e batimetria nel Golfo di Napoli ed alle Isole Eolie. Riunione Annuale Gruppo Nazionale per la Vulcanologia. Roma, 18 - 20 Dicembre
- Berrino G., Corrado G., Riccardi U., (1998). Sea gravity data in the Gulf of Naples. A contribution to the delineation of the structural pattern of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 82, 139-150.
- Berrino, G., Corrado, G., Riccardi, U., (2008). Sea gravity data in the Gulf of Naples; a contribution to delineating the structural pattern of the Phlegraean volcanic district. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175 (3), 241-252.
- Hildebrand, J.A, Stevenson, J.M., Hammer, P.T.C., Zumberge, M.A., Parker, R.L., (1990). A Sea floor and Sea Surface Gravity Survey of Axial Volcano. *Journal of Geophysical Research*, 95, 12751-12763. 24
- Instruction Manual Underwater Gravity System, (1989). LaCoste & Romberg, Gravity Meters Inc., ver. 3.
- Instruction Manual model G & D Gravity Meters, (2004). LaCoste & Romberg, Gravity Meters Inc.
- Longman, I.M., (1959). Formulas for computing the tidal acceleration due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64,2351- 2355.
- Morelli C.,Gantar C., Honkasalo T., Mc Connell R.C., Tanner I.G., Zzabo B., Uotila U., Whalen C.T., (1974). The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71). Special publication n.4, International Association of Geodesy, Paris, 196 pp.
- Moritz, A., (1984). Geodetic reference system 1980. In: Tscherning_Ed. *The Geodesist's Handbook*. C.C. Bull. Geod. 58, 388–398.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia