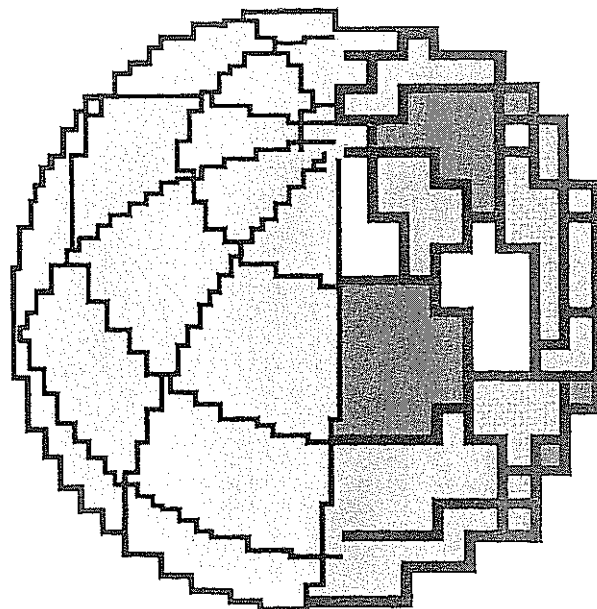


**Istituto Nazionale
di Geofisica**



Misura ed analisi delle maree terrestri:
la Stazione Gravimetrica del Brasimone

G. Casula

Misura ed analisi delle maree terrestri: la Stazione Gravimetrica del Brasimone

G. Casula

Istituto Nazionale di Geofisica
Via Di Vigna Murata, 605
00143 Roma Italy

Ottobre 1997

MISURA ED ANALISI DELLE MAREE TERRESTRI: LA STAZIONE GRAVIMETRICA DEL BRASIMONE

Giuseppe Casula
Istituto Nazionale di Geofisica
Via di Vigna Murata 605, Roma

1 - INTRODUZIONE.

La realizzazione di sensori gravimetrici tipo *massa-molla* (es. il microgravimetro LaCoste-Romberg Modello D) ha consentito negli ultimi decenni di misurare la variazione dell'accelerazione di gravità Δg con precisioni dell'ordine di 10^{-9} - 10^{-10} g.

Tali misure, effettuate con l'ausilio di apparati di conversione analogico-digitale e registrazione su supporti magnetici, forniscono una stima delle variazioni temporali di g dovute a fenomeni geofisici come la marea o le variazioni legate alla pressione atmosferica.

A partire dagli anni ottanta è nata una nuova generazione di gravimetri, i superconduttori, estremamente più affidabili e precisi dei sensori *massa-molla*, in quanto progettati specificamente per costituire stazioni di marea. In tali strumenti la forza di richiamo elastica della molla viene sostituita dalla forza di campo magnetico generata da due bobine superconduttrici termostattizzate alla temperatura dell'elio liquido. Tale meccanismo consente di eliminare i problemi tipici dei gravimetri meccanici come la deriva dovuta alla isteresi elastica della molla, le disomogeneità di rotazione della vite senza fine, eccetera.

Per effetto di queste loro caratteristiche strutturali i gravimetri superconduttori consentono di registrare le variazioni di g con precisioni superiori di circa due ordini di grandezza rispetto a quelle dei gravimetri meccanici, e si ipotizza che siano sensibili ad altri fenomeni geodinamici come ad esempio la variazione del livello medio dei mari, l'effetto gravitazionale del moto del polo o alle oscillazioni libere della terra dovute ai terremoti.

In questo lavoro vengono presentate alcune problematiche inerenti alla gestione di una stazione gravimetrica (Brasimone), fornita di gravimetro superconduttore, insieme con alcuni risultati preliminari dell'analisi dei dati registrati.

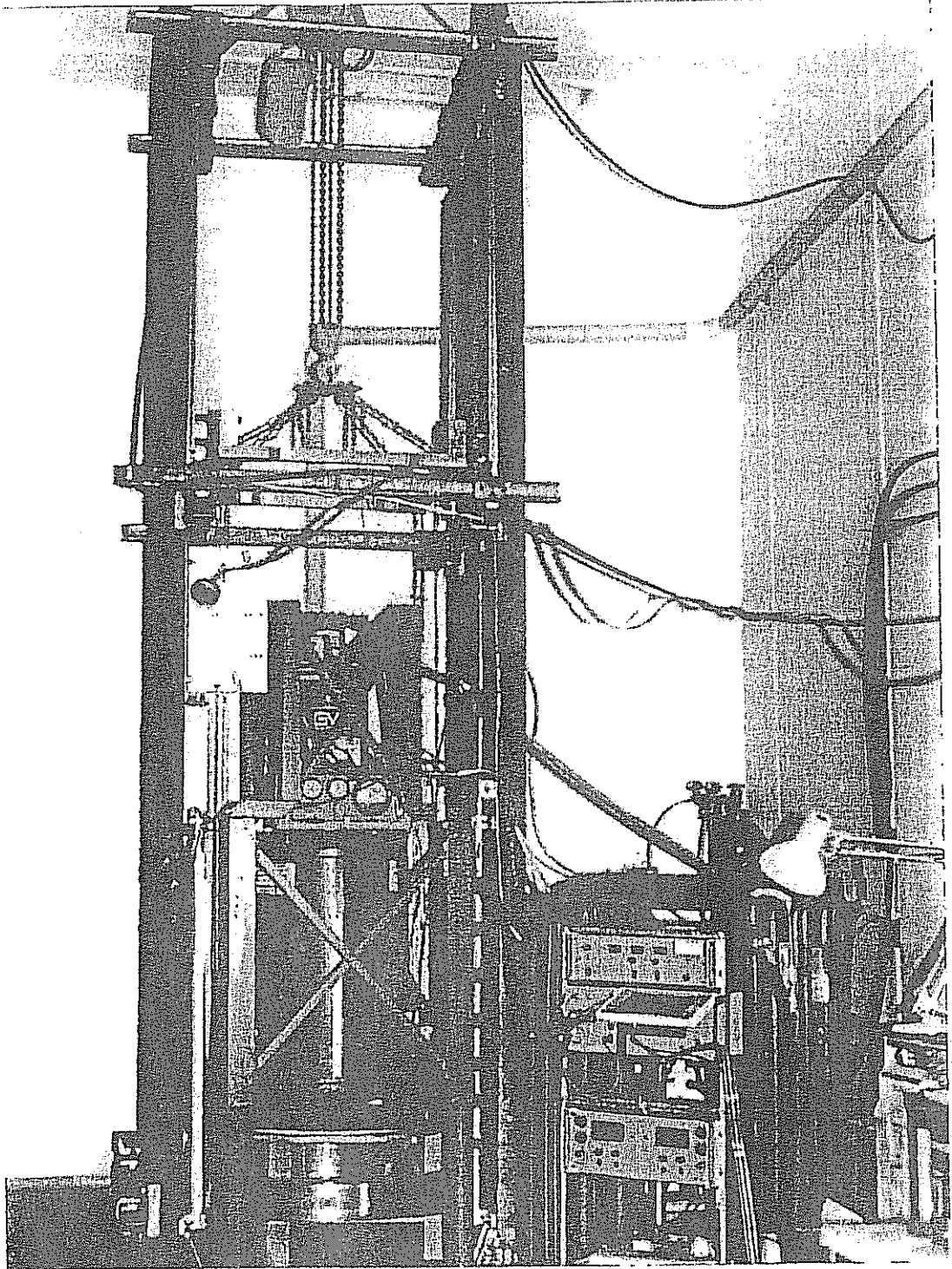


Fig. 1 - Il gravimetro superconduttore GWR T015 in stazione nei laboratori del Centro Ricerche Brasimone dell'ENEA.

2 - Il Gravimetro superconduttore GWR T015.

2.1 - Descrizione dello strumento.

Il principio base del gravimetro superconduttore GWR (Fig.1) è simile a quello di molti altri gravimetri esistenti: esso misura la forza gravitazionale esercitata su una piccola massa, debolmente vincolata alla propria posizione di equilibrio. Il tradizionale meccanismo di sospensione a molla (che è fortemente limitato dall'effetto di isteresi) è stato sostituito dalla levitazione magnetica ottenuta mediante l'uso di bobine superconduttrici. L'intrinseca stabilità delle supercorrenti, realizzata con l'utilizzo di bobine di metallo superconduttore termostattizzate alla temperatura dell'elio liquido, rende lo strumento di gran lunga superiore ad ogni altro gravimetro oggi esistente, sia in fatto di precisione che di affidabilità nel tempo. Notevoli accorgimenti sono previsti per eliminare i disturbi collegati alla variabilità delle condizioni fisiche in cui si opera.

La massa sensibile alle variazioni della gravità è costituita da una sferetta superconduttiva di niobio, del peso di circa 2 grammi. Il modo più semplice per realizzare un campo magnetico capace di sostenere la sfera è quello di utilizzare una singola spira superconduttrice.

Se la corrente che circola nella spira passa, in un intervallo di tempo arbitrario, dal valore zero ad uno costante diverso da zero, si creerà all'interno della bobina un campo magnetico che andrà ad investire anche la sfera sensibile. Per una delle proprietà fondamentali della superconduttività (effetto Meissner), che prevede che un campo magnetico non possa *penetrare* all'interno di un materiale superconduttore, si dovrà generare sulla superficie della sfera una corrente tale da creare, dentro di essa, un campo uguale ed opposto a quello della bobina; come risultato, quest'ultimo viene *espulso* all'esterno della sfera. Tale corrente genera una forza repulsiva fra la sfera e la spira superconduttrice; se la sfera si trova sull'asse della bobina, questa forza tenderà ad allontanarla lungo l'asse stesso, tranne nel caso, di equilibrio instabile, in cui la sfera si trovi esattamente nel centro (la forza è nulla). Ponendo la bobina orizzontale e sistemando la sfera in un certo punto dell'asse sopra di essa, è quindi possibile, variando i parametri del sistema, fare in modo che la repulsione magnetica equilibri la forza di gravità agente sulla sfera. Un motivo ben preciso rende però impraticabile lavorare nelle condizioni sopra descritte: il gradiente verticale del campo di forza risulterebbe troppo elevato, e ciò limiterebbe fortemente la sensibilità della sfera nei confronti del campo gravitazionale.

Per questa ragione il gravimetro GWR utilizza due bobine invece che una sola, poste una sopra l'altra, con il centro della sfera posizionato poco sopra il piano di quella superiore, come mostrato nella Fig.2.

La forza che sostiene la sfera è fornita quasi totalmente dalla bobina inferiore, mentre quella superiore ha il compito essenziale di attenuare i gradienti di forza vicino alla posizione di equilibrio. Variando la corrente nella bobina superiore si ha dunque la possibilità di cambiare il gradiente di forza; con quella inferiore si determina invece la posizione di equilibrio della sfera.

In condizioni operative, la forza di levitazione magnetica è costante nel tempo. Se la forza di gravità cambia, la sfera si sposterà dalla posizione iniziale di equilibrio ad un'altra; se lo spostamento non è troppo piccolo, nella nuova posizione il gradiente di forza differirà significativamente dal valore iniziale, facendo sì che un'ulteriore variazione della gravità, dello stesso tipo della precedente, provochi uno spostamento diverso da quello precedente. Questa non-linearità renderebbe arduo ottenere un valore molto preciso della gravità in funzione della posizione della sfera; inoltre ci si dovrebbe preoccupare di mantenere in asse la sfera durante i suoi movimenti. È dunque conveniente limitare al massimo gli spostamenti della sfera.

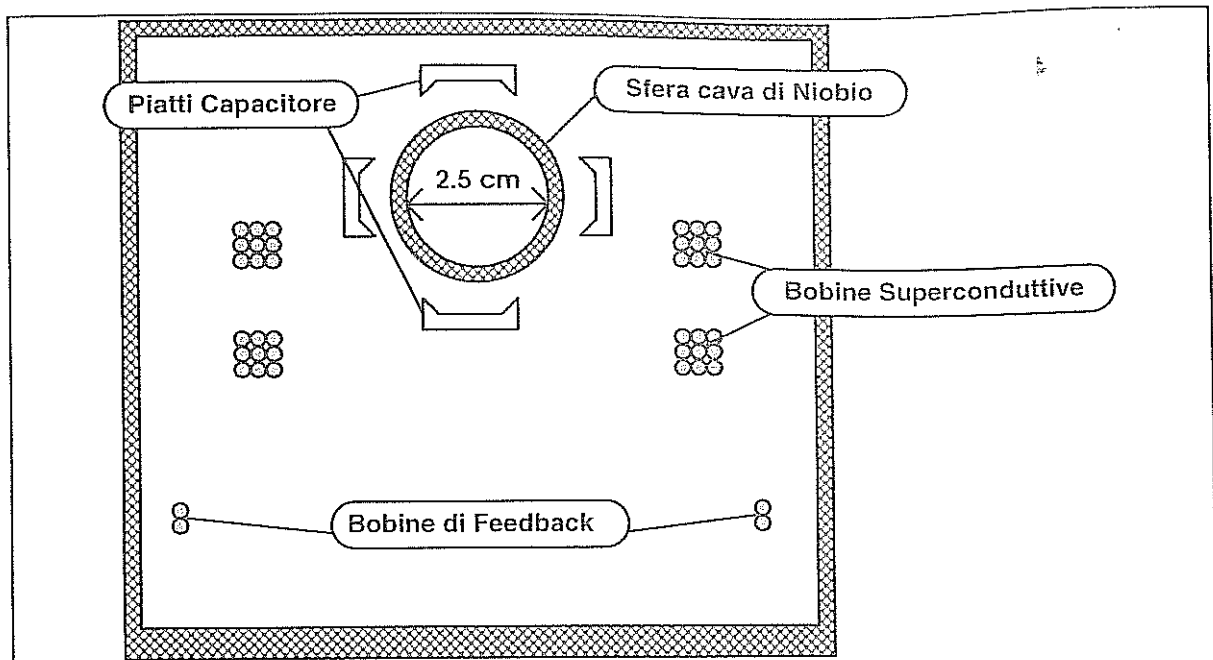


Fig. 2 - Schema del sensore di un gravimetro superconduttore.

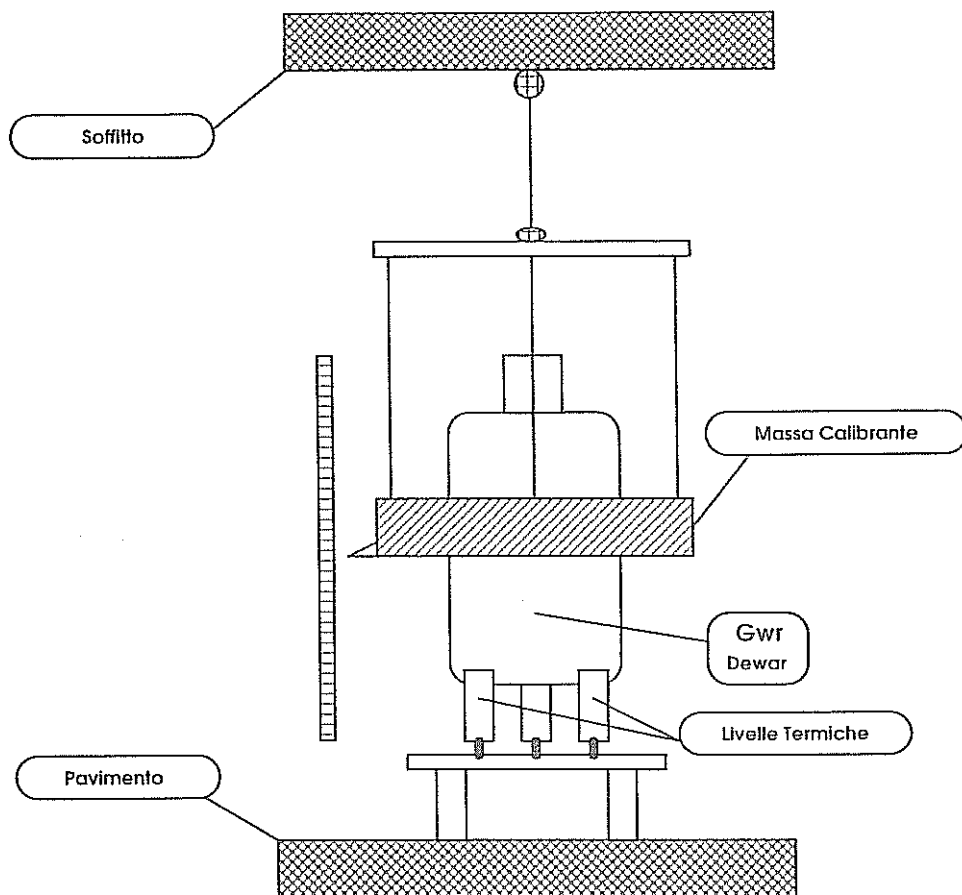


Fig. 3 - Schema dell'apparato di calibrazione del gravimetro GWR T015.

Nel gravimetro GWR questo è realizzato mediante una forza di retroazione, comandata dallo stesso segnale che permette di misurare la gravità. Uno spostamento della sfera provoca una variazione di capacità del condensatore che la circonda, e quindi genera un segnale di tensione.

Questo segnale viene amplificato ed applicato in retroazione ad una terza bobina indipendente dalle prime due posta sotto la sfera (bobina di *feedback*); l'azione magnetica conseguente riporta la sfera nella posizione iniziale. La corrente che circola in quest'ultima costituisce la misura di gravità [1].

Il corretto funzionamento del meccanismo richiede, ovviamente, che la posizione di equilibrio della sfera si trovi nelle vicinanze del centro del ponte capacitivo.

Se l'asse dello strumento si inclina di un angolo δ rispetto alla verticale, la componente dell'accelerazione di gravità ortogonale al piano della spira varrà $g \cos\delta$ anziché g ; ci si aspetterebbe, dunque, un valore più basso della misura di gravità. Accade invece che la sfera, subendo l'accelerazione orizzontale $g \sin\delta$, si allontana dall'asse delle spire verso una regione in cui il campo magnetico che la sostiene è meno intenso; essa, dunque, si abbassa e lo strumento misura un aumento di gravità. Per piccole inclinazioni, l'incremento può essere espresso, troncando lo sviluppo in serie della funzione coseno alle potenze di secondo grado, da $1/2 g \delta^2$, per 1 μrad si ottiene circa 0.5 $nGal$. Un complesso sistema di bilanciamento è previsto per mantenere l'inclinazione massima sotto i 3 μrad , con un conseguente errore sulla misura non superiore a 5 $nGal$. Uno sguardo alle dimensioni ed al peso dell'intero strumento (una struttura cilindrica di diametro di base 0.5 m, altezza 1.7 m e massa di circa 60 Kg) sottolinea quanto notevole sia questo risultato.

Il gravimetro è appoggiato su tre piedi, dei quali uno solo è fisso. L'unità fondamentale degli altri due piedi è un elemento suscettibile di espansione termica, il cui riscaldamento è provocato da un riscaldatore elettrico. A regolare, per ciascun piede, l'intensità della corrente elettrica del riscaldatore provvede un sensore di inclinazione, realizzato tramite due pendoli. Questo sistema è in grado di correggere inclinazioni non superiori a circa 1.7 $mrad$ rispetto alla verticale.

Il gravimetro utilizza elio liquido come refrigerante; esso è contenuto in un *dewar* interno della capacità di circa 60 litri. Quando il bagno di elio liquido assorbe calore, parte di esso evapora. Il risparmio di elio liquido si impone sia per ridurre la frequenza dei laboriosi riempimenti (che oltretutto compromettono le misure per non poche ore), sia per il suo elevato costo. È necessario quindi limitare al massimo la trasmissione di calore dall'ambiente esterno all'elio liquido.

Si vedrà in breve la soluzione adottata sul GWR. Il calore ceduto per conduzione viene drasticamente ridotto da molteplici strati isolanti, il più esterno dei quali è costituito da un'ampia camera a vuoto. Accorgimenti più complessi sono richiesti per limitare la trasmissione di energia per irraggiamento. Un corpo riduce esponenzialmente l'emissione di radiazione al diminuire della propria temperatura; inoltre l'energia elettromagnetica scambiata tra due corpi diminuisce al calare della loro differenza di temperatura. Tenendo conto di queste osservazioni si è pensato di circondare il *dewar* dell'elio liquido con due schermi freddi: il primo ha una temperatura vicina a quella del bagno stesso ($6^\circ K$), il secondo viene mantenuto a $77^\circ K$ e serve per smorzare ulteriormente il gradiente di temperatura verso l'esterno.

Per mantenere i due schermi alle rispettive temperature viene utilizzata una particolare macchina frigorifera (la cosiddetta *testa fredda*), costituita da un compressore esterno al gravimetro e da una struttura cilindrica, ad esso collegata, che penetra nella parte superiore dello strumento e si pone in contatto termico (ma non meccanico), in due punti distinti, con ciascuno schermo di radiazione. Il compressore comprime una certa quantità di elio, che poi raggiunge la testa fredda, dove subisce due espansioni successive in corrispondenza delle due aree di contatto termico, una

per ogni schermo, sottraendo calore a questi ultimi. Infine, per minimizzare l'assorbimento della radiazione incidente, ogni schermo è ricoperto da più strati di alluminio.

Con l'utilizzo della tecnologia descritta si ottiene una elevata risoluzione sulle variazioni della gravità ma non si ha nessun riferimento sul valore assoluto della stessa, risulta pertanto necessario verificare con periodicità di almeno sei mesi, la gravità assoluta nel sito stazione del gravimetro superconduttore mediante un gravimetro assoluto.

Con l'ausilio di tali esperimenti è possibile discernere fra eventuali derive strumentali, e variazioni della gravità nel sito dovute a fenomeni ambientali, in tal caso esisterà correlazione fra i residui dei due strumenti.

2.2 - Calibrazione elettrostatica.

La costante di proporzionalità tra il segnale di misura e la sua causa dipende unicamente dalla geometria e dalle correnti delle spire superconduttrici, nonché dalla resistenza di retroazione; quest'ultima è stata realizzata in modo da risultare il più possibile insensibile alla temperatura. È comunque previsto un circuito supplementare elettrostatico, capace di fornire una tensione nota al condensatore che circonda la sfera, allo scopo di determinare il valore di questa costante di proporzionalità (*calibrazione elettrostatica*).

La calibrazione elettrostatica è necessaria per collegare tra di loro misure distinte, caratterizzate da condizioni fisiche diverse del sensore.

Questa opportunità si è rivelata di fondamentale importanza, qualora il gravimetro venga spostato in diversi siti, con conseguente necessità di intervenire sulle correnti superconduttive per riportare la sfera nel campo di lavoro.

2.3 - Deriva e precisione della misura.

Per motivi non ancora compresi dagli stessi costruttori, il segnale di misura presenta una deriva temporale. È comunque possibile minimizzare l'effetto fino a ridurlo a non più di qualche μGal al giorno. Durante l'esperimento sul Brasimone si è constatata una deriva giornaliera costante di circa $2.6 \mu Gal$.

Riguardo alla precisione, il limite più grave è probabilmente costituito dalle oscillazioni intrinseche al funzionamento stesso del gravimetro, che, come si è detto, hanno un'ampiezza di circa $60 nGal$. Tramite filtraggio, è possibile ridurre tale effetto. A causa dei disturbi esterni di vario tipo è ragionevole ipotizzare un'incertezza di $10 nGal$ sulla misura.

2.4 - Calibrazione del gravimetro.

Per ottenere il valore dell'accelerazione di gravità che viene misurata dal gravimetro, occorre moltiplicare il suo segnale di uscita (in *Volt*) per un fattore di calibrazione che indicheremo con *C*, espresso in $\mu Gal/Volt$. I costruttori del gravimetro affermano che *C*, per i valori tipicamente usati per le correnti delle spire, si aggira sui $65 \mu Gal/Volt$ lasciando all'utente il compito di raffinare la sua conoscenza.

Per non pregiudicare la notevole accuratezza delle misure di gravità, la precisione che si richiede per la calibrazione risulta dell'ordine di 0.5% . Si è quindi deciso di calibrare il gravimetro mediante la variazione di forza gravitazionale dovuta allo spostamento di una massa nota nelle vicinanze del gravimetro.

Si è adottata come massa calibrante un anello d'acciaio che può essere mosso, mediante un argano elettrico, lungo il proprio asse (Fig 3). Tale forma consente di minimizzare gli errori legati alla incertezza nella conoscenza della posizione relativa della massa mobile e della sfera sensibile.

La forza gravitazionale esercitata da un anello di raggio interno r_1 , raggio esterno r_2 ed altezza h su una massa m posta sul suo asse a distanza z dal centro vale:

$$|F(z)| = |ma(z)| = 2\pi m G \frac{M}{\pi(r_2^2 - r_1^2)h} \Phi(z)$$

dove

$$\Phi(z) = [I_1^-(z) - I_2^-(z) + I_1^+(z) + I_2^+(z)]$$

con

$$I_{1,2}^\pm = [(z \pm h/2)^2 + r_{1,2}^2]^{1/2}$$

La perturbazione di gravità indotta dal movimento della massa è mostrato in Fig.4.

Dopo aver valutato tutte le incertezze relative alla misura delle grandezze coinvolte, comprese quella sul valore di G e quella sulla non conoscenza della coordinata orizzontale della sfera sensibile (errore massimo stimato in circa 1 cm), si è ottenuta l'accelerazione di gravità corrispondente ai due massimi:

$$a_{\text{max}}(z_m) = 3.37529 \pm 0.00077 \mu\text{Gal}$$

Tenendo conto anche dell'influenza gravitazionale del traliccio, dell'argano e dei cavi si ottiene

$$a(z_m) = 3.3262 \pm 0.0012 \mu\text{Gal}$$

$$a(-z_m) = 3.4048 \pm 0.0010 \mu\text{Gal}$$

Il valore previsto per il massimo effetto gravitazionale, ottenuto spostando l'anello dal massimo al minimo, è dunque:

$$\Delta a = a(z_m) - a(-z_m) = 6.731 \pm 0.002 \mu\text{Gal}$$

Tale effetto, confrontato con i dati sperimentali, fornisce, oltre all'analisi del segnale di calibrazione, anche i valori di posizione Z_{min} e Z_{max} corrispondenti al massimo ed al minimo effetto, il valore Z_G in cui l'effetto della massa è nullo, ed il valore della costante di calibrazione (Fig.4).

In un secondo metodo, detto *picco-picco*, viene portata la massa calibrante nella posizione corrispondente al massimo effetto gravitazionale, e dopo averla lasciata in tale posizione tre minuti, la si porta nella posizione di minimo effetto gravitazionale, dove viene lasciata altri tre minuti; questa operazione viene iterata diverse volte al fine di ottenere un'onda quadra di calibrazione (Fig.5).

La costante di calibrazione dello strumento sarà data dal rapporto fra l'effetto teorico ed il valor medio degli *scalini*, che rappresenta la risposta dello strumento alla variazione della gravità indotta dalla massa calibrante. Il risultato cumulativo degli esperimenti di calibrazione dello strumento negli anni 1990-1996 viene mostrato in Tab.I, insieme con il loro errore ed i risultati delle calibrazioni elettrostatiche; queste ultime sono state realizzate misurando la risposta dello strumento ad una differenza di potenziale nota, applicata alle armature del capacitore del circuito di *feedback* del GWR [3],[4].

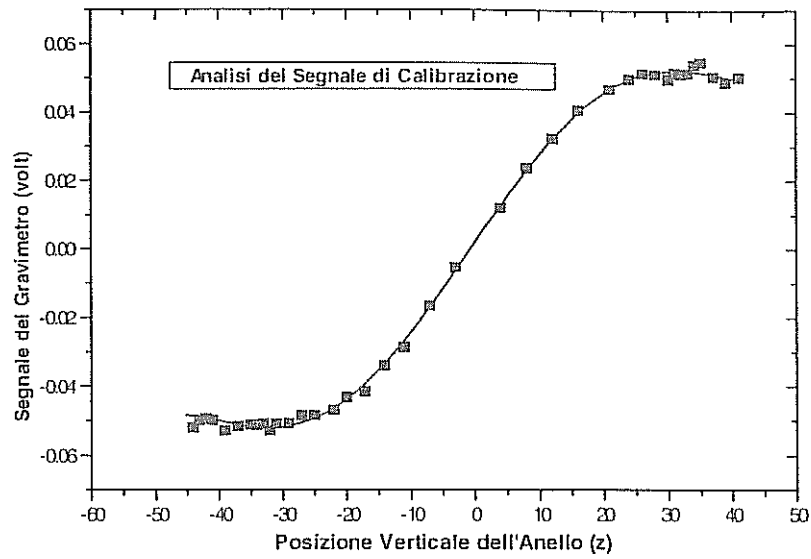


Fig.4 - Esempio di *analisi del segnale di calibrazione*: il segnale del gravimetro (quadrati pieni in figura) viene correlato con l'effetto teorico della massa calibrante (linea continua).

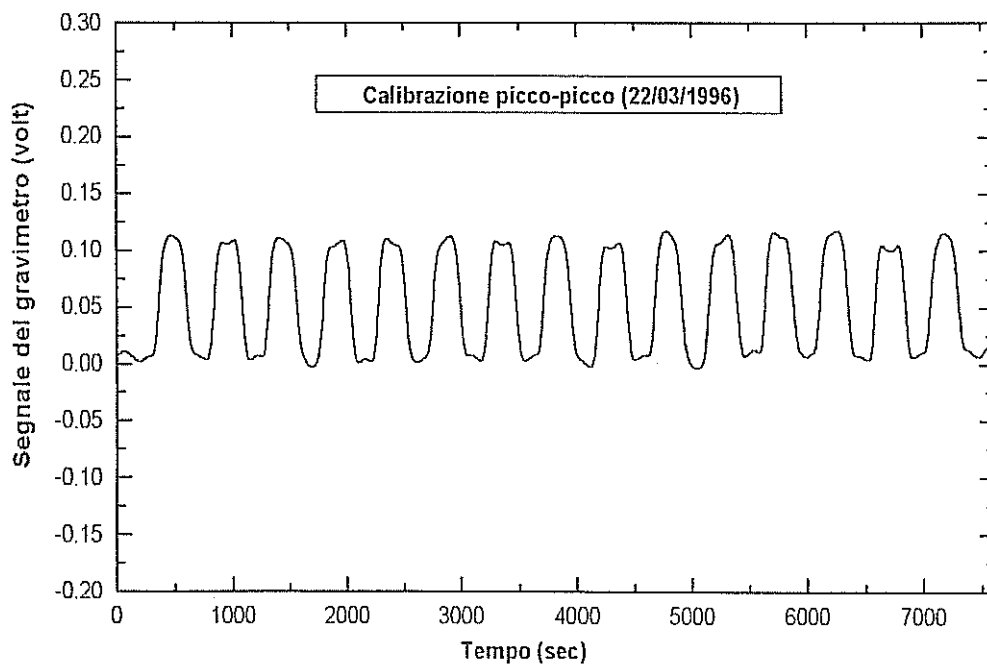


Fig.5 - Esempio di calibrazione *picco-picco*: la massa calibrante viene spostata dalla posizione di massimo effetto alla posizione di minimo effetto in un periodo di circa 6 minuti.

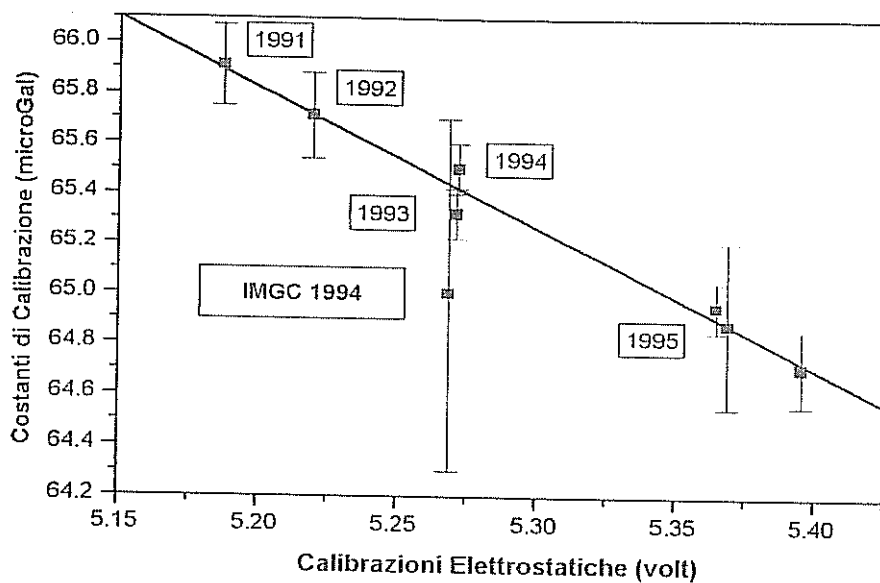


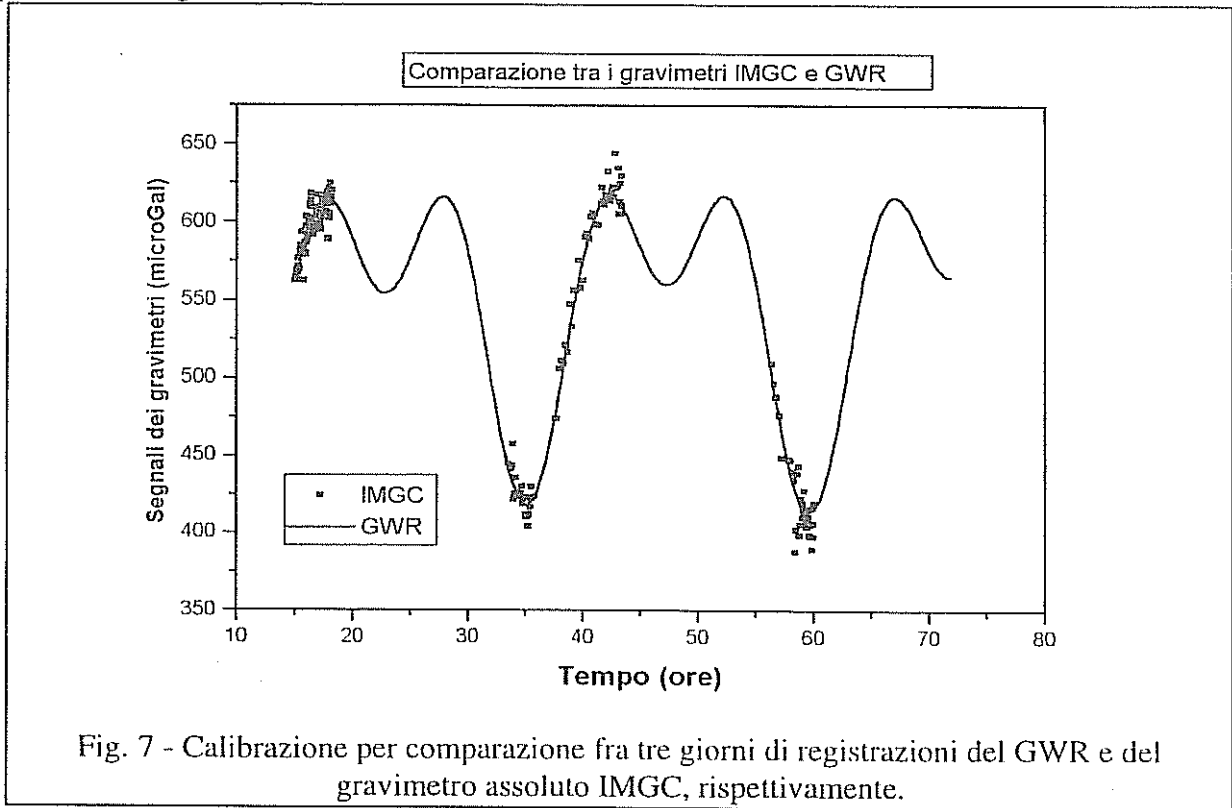
Fig. 6 - Comparazione fra le costanti di calibrazione dell'anello e le corrispondenti calibrazioni elettrostatiche.

Anno	Metodo	Fattori di Calibrazione ($\mu\text{gal/volt}$)	Calibrazioni Elettrostatiche (volt)
1991	PSC	65.91 \pm 0.16	5.1875 \pm 0.0009
1992	PSC	65.71 \pm 0.17	5.2198 \pm 0.0003
1993	PSC	65.32 \pm 0.10	5.2715 \pm 0.0003
1994	PSC	65.50 \pm 0.10	5.2722 \pm 0.0003
1995a	PSC	64.95 \pm 0.10	5.3650 \pm 0.0003
1995b	PSC	64.88 \pm 0.18	5.3691 \pm 0.0005
1996	PSC	64.71 \pm 0.15	5.3958 \pm 0.0004

Data	Gravimetro Assoluto		Calibrazione Anello	
	Numero Lanci	Fattore di Calibrazione ($\mu\text{gal/volt}$)	Calibrazione Elettrostatica (volt)	Calibrazione con Anello ($\mu\text{gal/volt}$)
1994-5-9,10,11	166	64.4 \pm 0.5	5.2687 \pm 0.0003	65.26 \pm 0.12
1994-5-10	65	65.0 \pm 0.7		

Tab I - Risultati delle calibrazioni con l'anello, delle relative calibrazioni elettrostatiche e della calibrazione per confronto con il gravimetro assoluto.

In Fig.6 viene rappresentato il risultato di una regressione lineare pesata dei valori delle costanti di calibrazione in funzione dei valori delle corrispondenti calibrations elettrostatiche; la linearità della dipendenza della funzione di calibrazione da quella elettrostatica testimonia l'efficacia di quest'ultima nel normalizzare la costante di calibrazione, che può essere ottenuta con una precisione migliore dello 0.2 %.



2.5 - Calibrazione per confronto con misure assolute.

Nell'Aprile 1994 è stato effettuato nel sito PEC del Brasimone un secondo esperimento di calibrazione; un gravimetro assoluto dell'Istituto di Metrologia G. Colonetti di Torino, basato sul principio *Symmetrical Rise and Fall* [4] è stato messo in stazione dal giorno 9-5-1995 al giorno 11-5-1995, nel laboratorio che ospita anche il gravimetro superconduttore. Sono stati effettuati 166 lanci dell'equipaggio mobile su un arco di tempo comprendente due massimi e due minimi della curva di marea; i dati così rilevati sono stati poi elaborati, calcolando i valori della gravità assoluta e confrontandone le variazioni con quelle registrate dal gravimetro superconduttore, (Tab.I), (Fig.7). Il valore della costante di calibrazione così calcolata differisce dai valori della calibrazione assoluta meno dell'1 % [3].

3 - Analisi di Marea.

3.1 - Metodo di Venedikov.

Utilizzando la costante di calibrazione precedentemente determinata per l'anno 1992, sono state registrate con continuità presso il laboratorio del P.E.C. le variazioni di gravità legate agli effetti di marea, relative al periodo compreso fra il 1/8/1992 ed il 31/12/1992. I cinque mesi di registrazioni sono stati analizzati per determinare le armoniche principali del modello di marea corrispondente alla stazione del Brasimone. Il dato, campionato originariamente ogni secondo e ridotto ad una frequenza di un campione al minuto, è stato interpolato mediante regressione

polinomiale, in quegli intervalli di tempo in cui presentava delle *interruzioni*, laddove tali *interruzioni* sono inferiori ad alcune ore; in tal maniera è stato prodotto un *file* di dati di marea di frequenza oraria. L'analisi di marea si basa sull'algoritmo di Venedikov [5]; si applica alle serie temporali un filtro passa banda, che lascia inalterate le tre bande principali di marea (frequenze diurne, semi diurne e terdiurne). Si effettua quindi un adattamento con il metodo dei minimi quadrati di un modello teorico di marea basato sullo sviluppo in serie del tempo del potenziale di marea di Cartright e Tayler [10].

L'algoritmo che ne deriva seleziona i coefficienti delle armoniche che minimizzano i residui fra dati sperimentali e le registrazioni di marea, tenuto conto del dato di pressione atmosferica e di un polinomio che approssima la deriva di lungo termine.

L'equazione sotto riportata fornisce una mappa formale di tale algoritmo:

$$l(t) + v(t) = \sum_{i=1}^n \delta_i A_i(\text{teor}) \cos(\omega_i t + \Phi_i(\text{teor}) + \Delta\Phi_i) + C(t) + D(t)$$

In essa $l(t)$ rappresenta le letture gravimetriche, $v(t)$ è il residuo che deve essere minimizzato; al secondo membro dell'equazione compaiono le corrispondenti ampiezze A_i , fattori gravimetrici δ_i e fattori di fase $\Delta\Phi_i$ relativi alle diverse onde di marea, $D(t)$ rappresenta la deriva strumentale, che nel nostro caso è lineare nel tempo e $C(t)$ è un fattore di normalizzazione.

In Tab. II viene riportato il risultato dell'analisi di marea per la stazione del Brasimone; sono state classificate le seguenti armoniche: M_2 ed S_2 principali semi diurne, O_1 , P_1 , S_1/K_1 , declinazionali diurne delle onde principali lunare, solare e luni-solare, Q_1 ellittica della declinazionale lunare O_1 , N_2 ed L_2 ellittiche della lunare semi diurna M_2 ; la M_3 principale terdiurna lunare è l'unica componente di periodo inferiore alle 12 ore classificata.

ONDA	Ampiezza Stimata H (μGal)	Fattori di Ampiezza δ	Diff. di Fase $\Delta\Phi$ ($^\circ$)
Q1	6.91 +/- 0.03	1.1618 +/- 0.0052	-0.18 +/- 0.26
O1	35.99 +/- 0.03	1.1590 +/- 0.0010	-0.05 +/- 0.05
NO1	2.82 +/- 0.02	1.1537 +/- 0.0093	0.38 +/- 0.46
P1	16.83 +/- 0.03	1.1646 +/- 0.0019	0.10 +/- 0.09
S1K1	50.03 +/- 0.03	1.1455 +/- 0.0006	0.07 +/- 0.03
J1	2.83 +/- 0.03	1.1578 +/- 0.0118	-0.41 +/- 0.58
OO1	1.50 +/- 0.03	1.1210 +/- 0.0193	1.17 +/- 0.99
2N2	1.37 +/- 0.01	1.1607 +/- 0.0102	0.48 +/- 0.50
N2	8.71 +/- 0.01	1.1752 +/- 0.0019	1.48 +/- 0.09
M2	46.00 +/- 0.01	1.1883 +/- 0.0004	0.94 +/- 0.02
L2	1.29 +/- 0.02	1.1752 +/- 0.0194	2.26 +/- 0.94
S2	21.44 +/- 0.01	1.1905 +/- 0.0008	-0.01 +/- 0.04
K2	5.82 +/- 0.01	1.1890 +/- 0.0030	0.44 +/- 0.14
M3	0.59 +/- 0.01	1.0722 +/- 0.0153	-1.63 +/- 0.80

Tab. II - Risultati dell'analisi di marea con il metodo di Venedikov.

Per ogni armonica è stato determinato il fattore di ampiezza, il fattore di fase ed il fattore gravimetrico medio con i relativi errori. L'effetto di carico oceanico è stato corretto utilizzando le carte cotidali di Sewidersky, mediante l'algoritmo di Farrel [7]. Esso risulta essere pari a circa il 2 % delle ampiezze delle componenti in esame.

Sono stati inoltre determinati i termini di deriva strumentale e di correlazione con la pressione atmosferica [6].

3.2 - Il metodo di Wenzel.

Nel Luglio 1995 è stato acquisito il programma ETERNA 3.20 atto alla preelaborazione ed alla elaborazione del dato di marea.

Tale programma, implementato dal Professor Wenzel dell'Istituto di Geodesia dell'Università di Karlsruhe, è un software *fortran 77* con alcune utilità grafiche scritte nei linguaggi *C++* e *Quick Basic*; esso è costituito essenzialmente di un preelaboratore detto PRETERNA e di un programma per l'analisi finale detto ETERNA.

Il programma PRETERNA 3.20 consente di preelaborare dati di maree terrestri campionati con la frequenza di un dato al minuto [8].

La preelaborazione dei dati viene eseguita mediante una tecnica detta di *Remove-Restore* (simile alle tecniche di *Remove-Restore* utilizzate nell'analisi dei dati del campo gravitazionale). Inizialmente vengono rimossi tutti i segnali noti, (essenzialmente un modello di marea iniziale e l'effetto di pressione barometrica); il segnale residuo viene quindi liscio mediante l'eliminazione degli *scalini dei picchi* e delle *interruzioni* (Fig.8); infine i segnali noti vengono nuovamente sommati al residuo ripulito. Mediante questa procedura vengono eliminati eventuali errori di modellazione della pressione barometrica e della marea. Le *interruzioni* vengono successivamente eliminate interpolando i dati di pressione barometrica e di marea [8]. Gli osservabili corretti mediante la predetta procedura vengono filtrati numericamente e decimati con un passo di campionamento prima di 5 minuti e quindi di 1 ora. Il processo di preelaborazione del dato può essere riassunto nella seguente sequenza:

- a) Passo 1: calibrazione.
- b) Passo 2: eliminazione della marea teorica e della deriva.
- c) Passo 3: eliminazione dei *picchi* delle *interruzioni* e degli *scalini*.
- d) Passo 4: filtraggio numerico e decimazione a 5 minuti.
- e) Passo 5: filtraggio numerico e decimazione ad 1 ora.

Il risultato finale della preelaborazione fornisce dati con frequenza oraria continui che possono essere analizzati con il programma ETERNA 3.20.

3.2.1 - Calibrazione.

Il primo passo della preelaborazione consiste nella calibrazione del dato gravimetrico e della pressione barometrica.

A partire da un *file* di dati *ASCII* in formato internazionale, e note le costanti di calibrazione del gravimetro e del barometro che vengono indicate in un *file* di parametri preparato in precedenza dall'utente, gli osservabili gravità e pressione barometrica vengono calibrati, utilizzando la funzione di calibrazione precedentemente determinata (vedi paragrafo 1.3), in nm/s^2 ed in *HPA*, rispettivamente. A questa procedura si aggiunge un controllo della sequenza dei dati per verificare la presenza di eventuali *interruzioni*.

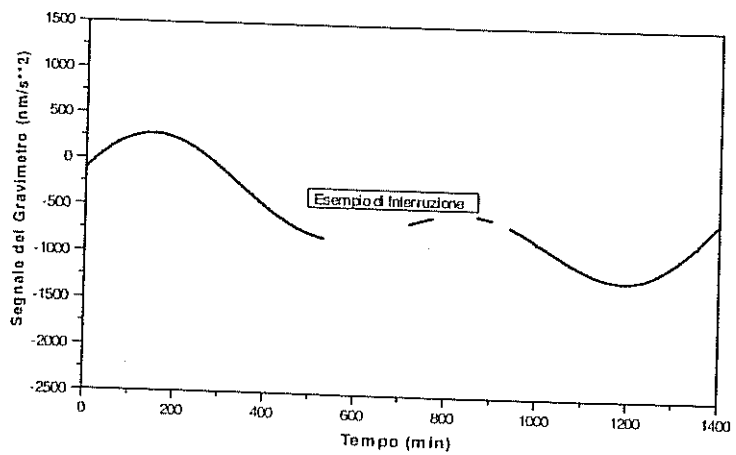
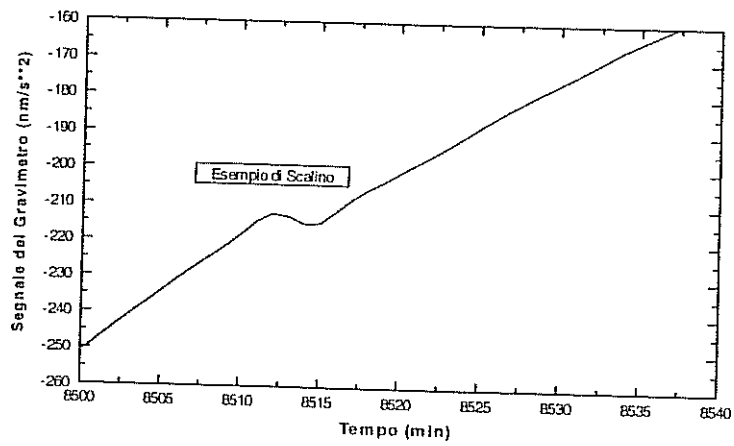
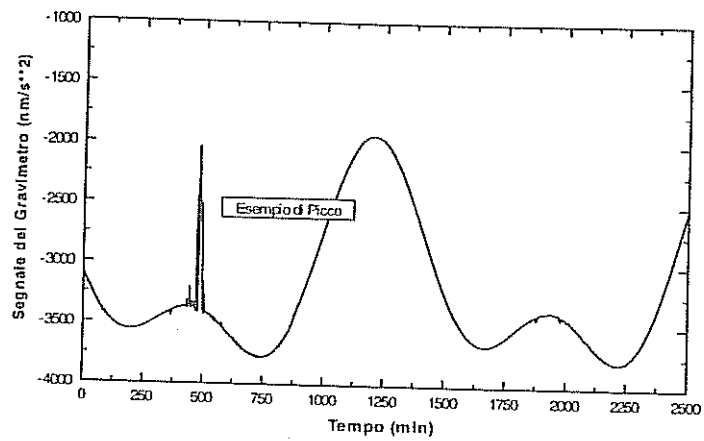


Fig. 8 - Esempi di *picco*, *scalino* ed *interruzione*, su dati della stazione gravimetrica del Brasimone.

3.2.2 - Calcolo del modello di marea e di deriva.

In questa fase vengono calcolati i modelli di marea e di deriva; il modello di marea viene calcolato utilizzando uno dei seguenti cataloghi: Doodson (1921), 379 onde [9], Cartright Tayler ed Edden (1973), 505 onde [10], Bullesfeld (1985), 656 onde [11] e Tamura (1987), 1214 onde [12]. La correzione dall'effetto di pressione barometrica viene effettuata mediante un'ammettenza media reale, secondo lo schema:

$$R = T_i - T_m - \alpha * P$$

dove R è il residuo, T_i è la gravità misurata, T_m la marea del modello, α l'ammettenza reale di pressione barometrica e P è la pressione barometrica.

3.2.3 - Eliminazione degli *scalini*.

Inizialmente vengono calcolate le medie semiorarie dei residui insieme con la loro deviazione standard. Mediante questi valori medi semiorari dei residui viene iniziata una ricerca iterativa degli *scalini*; un polinomio di primo grado con due coefficienti di grado zero (uno per la prima mezz'ora di dati e l'altro per la seconda) viene adattato ai minimi quadrati su di un intervallo di dieci ore di dati.

L'iterazione viene realizzata avanzando di mezz'ora in mezz'ora sulla serie del tempo in esame. La deviazione standard delle medie semiorarie dei residui viene usata per il calcolo dei pesi da utilizzare durante la correzione degli *scalini*. Durante la ricerca iterativa si definisce uno *scalino* ogni qual volta la differenza fra i coefficienti di ordine zero della regressione eccede il triplo della deviazione standard della stima o supera un valore limite (*STEPDETLIM*), indicato dall'utente in un *file* di parametri utilizzato dal preelaboratore. La predetta procedura viene iterata fin quando non vengono eliminati tutti gli *scalini*; va tuttavia messo in evidenza che la procedura automatica è in grado di correggere solo i grossi *scalini*. Per i piccoli *scalini* occorre utilizzare un *editor* grafico il *PREGRED*, (*PRETERNA GRAPHICAL EDITOR*), che consente di correggere a mano i piccoli disturbi.

L'utilizzo sia della procedura automatica che della procedura manuale consente di ridurre la deviazione standard del residuo del dato di marea fino a valori di pochi mm/s^2 .

3.2.4 - Eliminazione dei *picchi*.

L'eliminazione dei *picchi* si effettua utilizzando i residui calcolati nel precedente passo; al residuo campionato con frequenza del minuto viene adattato ai minimi quadrati un polinomio di secondo grado su di un periodo di 120 minuti; il massimo residuo della regressione polinomiale su di una finestra centrale di +/- 30 min attorno all'epoca centrale, viene paragonato con un valore limite detto *SPIKDETLIM* indicato dall'utente nel *file* di parametri iniziali. Se il predetto residuo eccede il triplo della deviazione standard della regressione viene corretto a livello dell'osservabile gravità, e l'adattamento ai minimi quadrati viene ripetuto spostando in avanti la finestra temporale (120 minuti) di 15 minuti.

Inizialmente il valore limite viene moltiplicato per 64, questo valore viene diviso per due ad ogni iterazione fino a raggiungere valori dei *picchi* paragonabili con la deviazione standard dell'adattamento ai minimi quadrati.

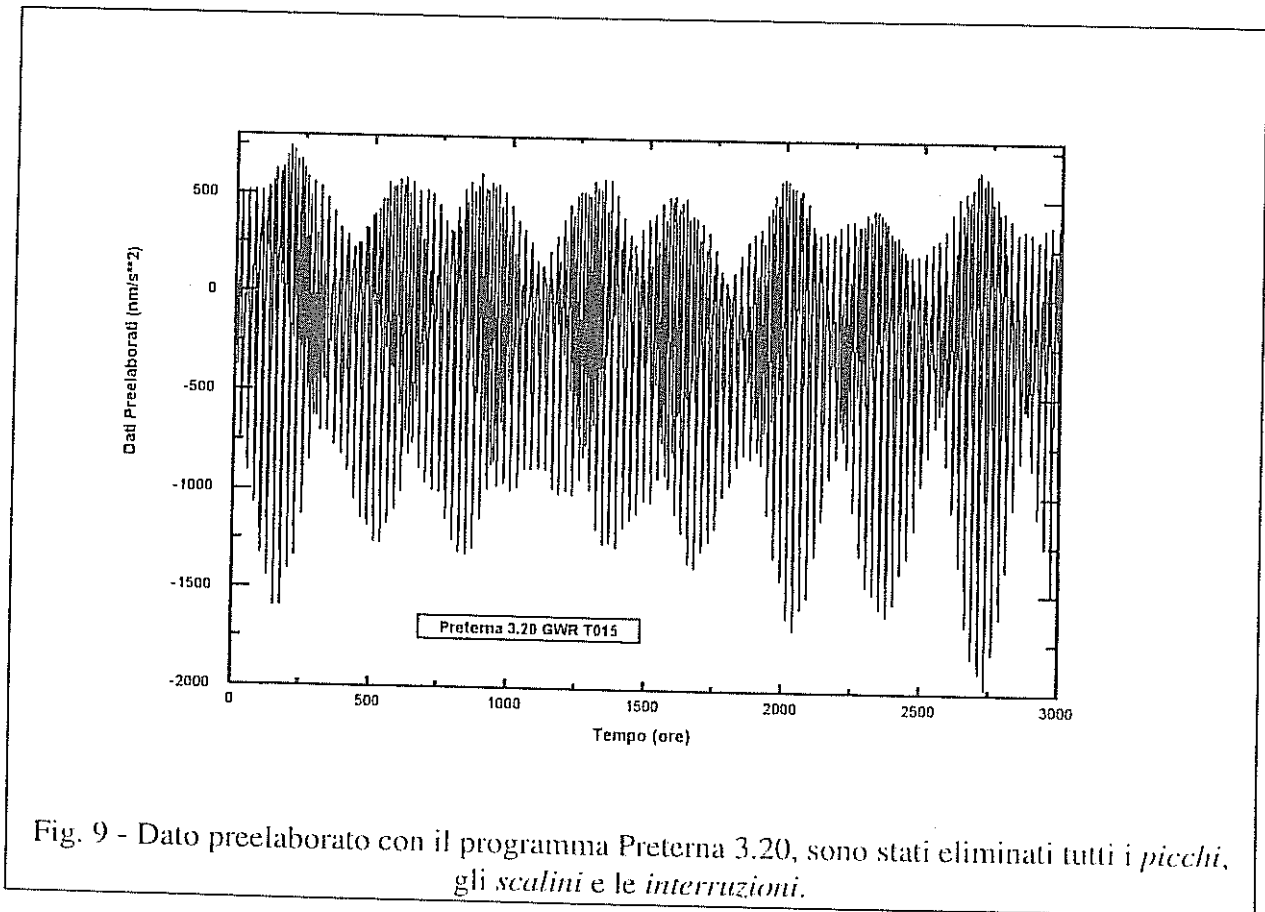
3.2.5 - Interpolazione delle *interruzioni*.

Per eliminare le *interruzioni*, si ricercano innanzitutto le suddette nelle registrazioni di pressione barometrica e successivamente si interpolano mediante un polinomio del primo ordine. Per

quanto riguarda le *interruzioni* nel dato gravimetrico, viene usato un polinomio del primo ordine, estrapolando iterativamente di 10 minuti in 10 minuti i dati ai lati dell'*interruzione* stessa. È necessario mettere in evidenza che il valore massimo di un *interruzione* interpolabile è di circa 48 ore, oltre tale durata la sequenza temporale viene spezzata in due blocchi.

3.2.6 - Filtraggio e decimazione.

In seguito all'interpolazione delle *interruzioni* i dati di gravità e pressione barometrica vengono filtrati numericamente usando un filtro passa basso di lunghezza di circa due ore e con un periodo di *cutoff* di 15 minuti.



Dopo il filtraggio, i dati di pressione barometrica e di gravità vengono ricampionati con frequenza di 5 minuti, la gravità viene ricostruita secondo il seguente algoritmo:

$$T_i = \alpha * P + T_m + R,$$

dove R è il residuo, T_i è la gravità misurata, T_m la marea del modello, α l'ammettenza reale di pressione barometrica e P è la pressione barometrica.

Il dato così ottenuto viene filtrato numericamente con un filtro passa basso a 241 coefficienti (circa 14 ore di lunghezza), con un periodo di *cutoff* di 2 ore e ricampionato con frequenza oraria utilizzando l'espressione indicata in precedenza. L'uscita oraria è una serie del tempo continua senza *interruzioni* e corretta da *picchi* e *scalini* (Fig.9). Tale dato risulta utilizzabile per l'analisi finale.

3.2.7 - Analisi finale.

L'analisi finale con il metodo di Wenzel viene eseguita mediante l'utilizzo del programma ETERNA 3.20 [8], tale programma consente l'aggiustamento di parametri di marea; ampiezze, fattori di ampiezza δ e fasi delle principali armoniche dello sviluppo in serie del potenziale gravitazionale secondo il catalogo scelto dall'utente, (es. Tamura 1987)[12].

Risulta poi possibile eliminare la deriva strumentale utilizzando filtri passa alto o modellizzandola mediante polinomi di Tschebyscheff del secondo ordine. È anche possibile utilizzare dati di differenti sensori poiché è prevista la possibilità di introdurre un tempo di ritardo, dovuto ai differenti sistemi di acquisizione utilizzati.

Per stimare le armoniche di marea di differente grado ed ordine viene utilizzato un modello iniziale di terra ellittica con rotazione uniforme priva di oceani, con uno nucleo esterno liquido ed un mantello viscoso.

Tale modello, detto di Wahr-Dehant-Zschau [13], viene utilizzato essenzialmente per stimare la differente risposta di una terra elastica alle onde di marea di differente grado ed ordine all'interno di uno stesso gruppo, (diurne, semi diurne, terdiurne ed onde di lungo periodo); cioè i fattori di ampiezza teorici per ogni onda.

Ai valori a priori delle ampiezze e delle fasi dello sviluppo in serie di armoniche del potenziale gravitazionale secondo Tamura [12] ed in base ai fattori di ampiezza calcolati dai *numeri di Love* forniti dal predetto modello, vengono adattati ai minimi quadrati i valori sperimentali delle predette grandezze, minimizzando il residuo fra la marea del modello ed il dato gravimetrico del gravimetro superconduttore.

Nell'ambito della stessa analisi risulta possibile stimare, effettuando una correlazione fra il residuo, la pressione barometrica e l'effetto gravitazionale teorico dovuto al moto del polo dell'asse di rotazione terrestre, un parametro di ammettenza di pressione barometrica reale, un parametro di ammettenza del moto del polo dell'asse di rotazione terrestre e la deriva strumentale. In Tab. III vengono rappresentati i valori delle ampiezze, dei fattori di ampiezza e delle fasi di alcune onde diurne, semi diurne, terdiurne, quattordicinali e mensili, stimate da dati del gravimetro superconduttore GWR T015 con il metodo di Wenzel con le rispettive deviazioni standard.

Viene inoltre rappresentato il valore dell'ammettenza reale di pressione barometrica $\alpha = -2.712 \pm 0.046 \text{ nm/s}^2 \text{ HPa}$, che è stato usato in fase di preelaborazione per eliminare anche se parzialmente l'effetto gravitazionale dovuto alla pressione barometrica.

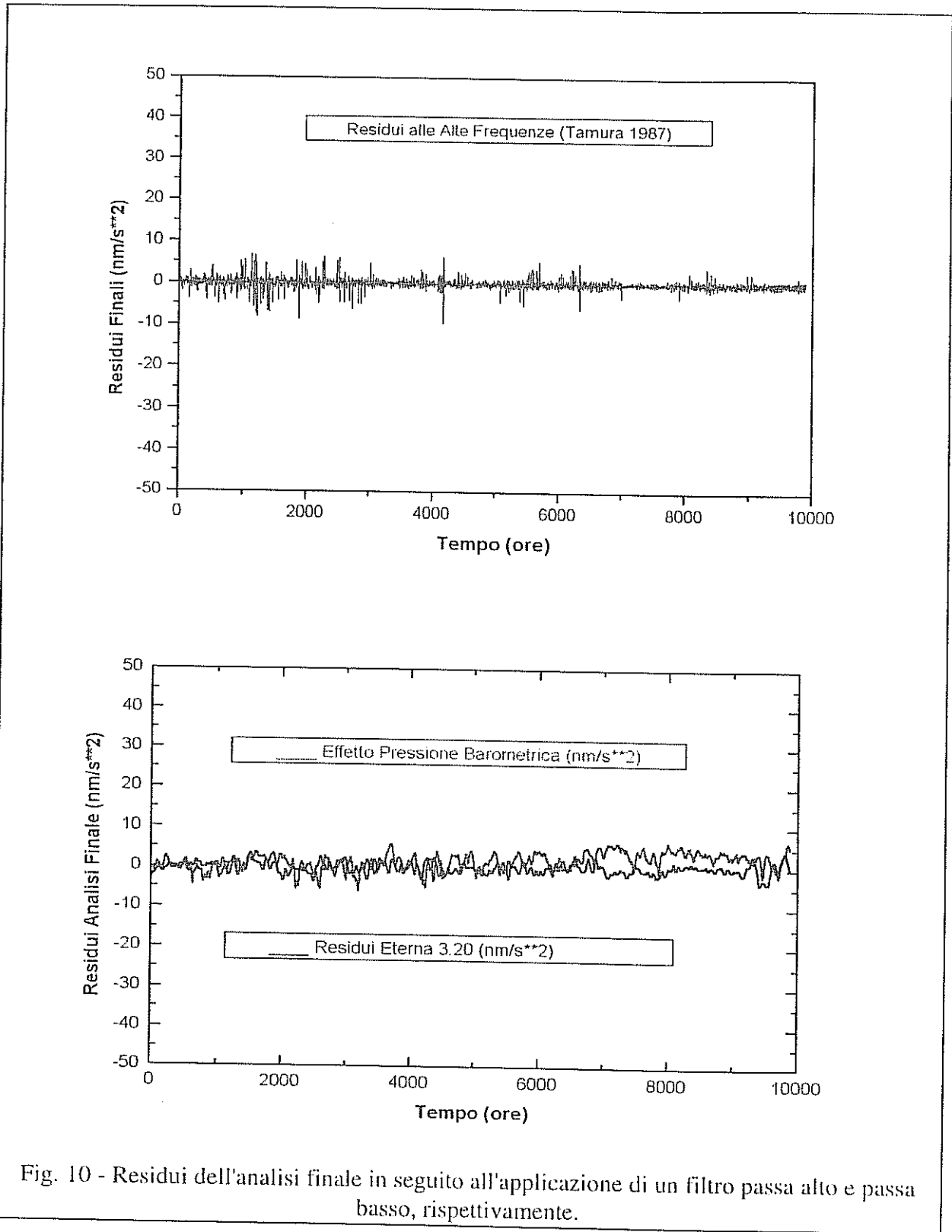
Il programma Eterna è dotato anche di numerosi filtri passa alto (Pertsev, Wenzel ecc.) mediante i quali è possibile filtrare i residui eliminando gli effetti di fenomeni non mareali, come la variazione di pressione barometrica dovuta alle perturbazioni meteorologiche, che non è stato possibile correggere utilizzando un'ammettenza media reale.

In Fig.10 viene rappresentato il residuo filtrato con un filtro passa alto di Pertsev della durata di 51 ore, ed il residuo filtrato con un filtro passa basso di Wenzel.

Si può notare come il valore del residuo alle alte frequenze sia estremamente piccolo, ($\sigma = \pm 2.565 \text{ nm/s}^2$); a testimonianza della scarsa rumorosità del sito, della efficacia del sistema di calibrazione e della potenza della procedura di elaborazione adottata.

Modello di Marea per la stazione del Brasimone Catalogo di Tamura 1987					
Onda	Ampiezza (nm/s ²)	Fattore Amp. δ	EQM	Diff. di Fase (°)	EQM
Ssa	16.363	1.21536	0.23570	2.8103	17.4432
Mm	17.461	1.14251	0.01191	0.7619	0.6864
Mf	33.440	1.15578	0.00646	-0.5506	0.3678
Mtm	6.327	1.14222	0.02033	0.7548	1.1687
Q1	68.814	1.15753	0.00115	-0.2259	0.0660
O1	356.570	1.14837	0.00022	-0.3103	0.0129
M1	28.165	1.15337	0.00251	-0.3155	0.1439
PI	165.854	1.14798	0.00040	-0.1955	0.0229
K1	499.034	1.13263	0.00015	-0.0815	0.0086
J1	28.526	1.16206	0.00292	-0.5713	0.1672
OO1	15.214	1.11290	0.00772	-0.4921	0.4423
2N2	13.715	1.15856	0.00326	0.9383	0.1869
N2	87.185	1.17612	0.00068	1.3003	0.0387
M2	456.727	1.17963	0.00012	0.5827	0.0071
L2	12.766	1.16656	0.00285	-0.2871	0.1634
S2	212.537	1.17988	0.00028	-0.5062	0.0160
K2	57.919	1.18276	0.00133	-0.3076	0.0763
M3	5.815	1.06302	0.00319	-0.1434	0.1828
Deviazione Standard del Residuo = 2.595 (nm/s ²) Ammettenza di Pressione Barometrica: $\alpha = -2.712 \pm 0.046$ (nm/s ² *HPa)					

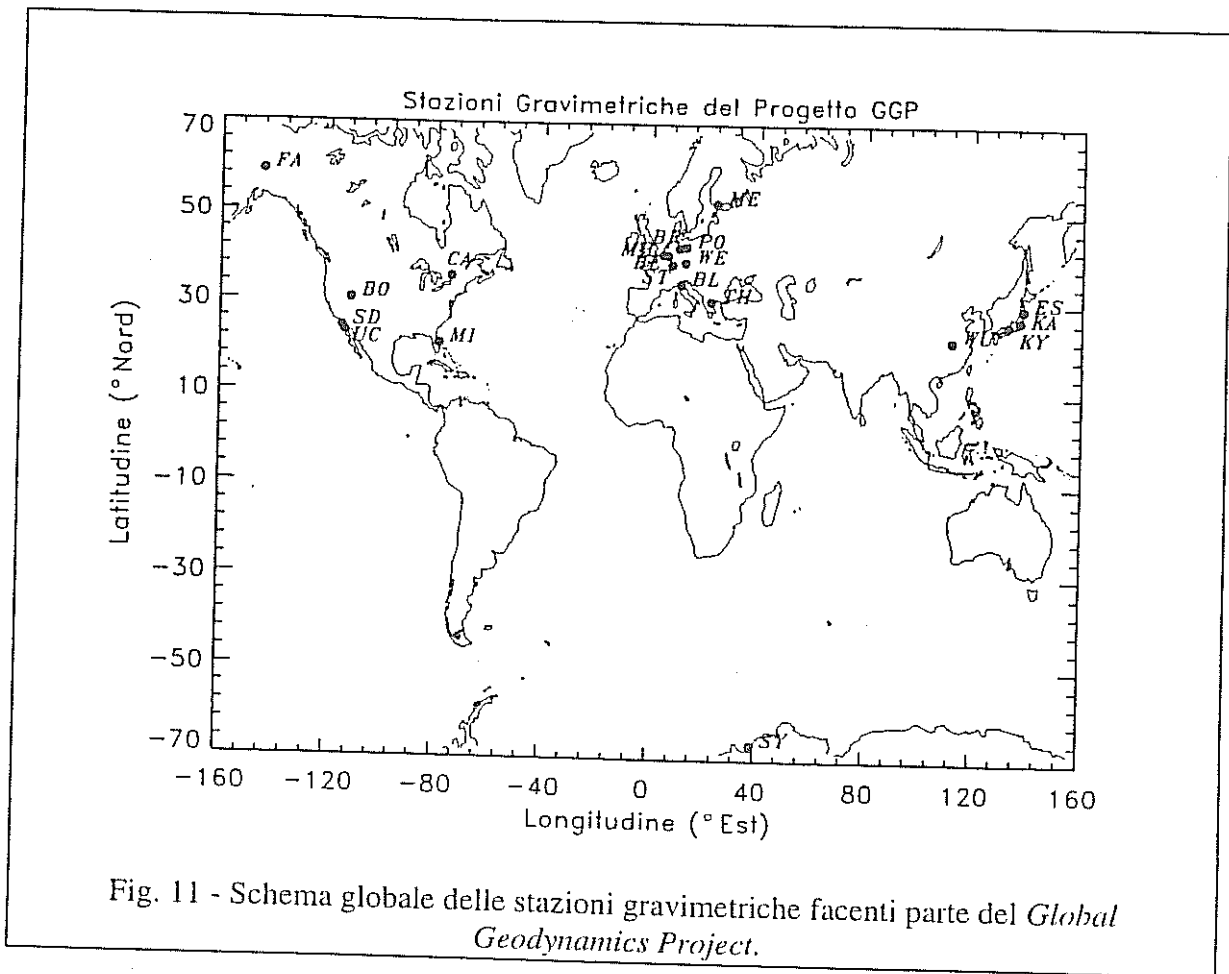
Tab. III - Risultati dell'analisi di marea con il metodo di Wenzel, le armoniche stimate si riferiscono al catalogo di Tamura 1987, (1214 onde).



4 - Il progetto GGP.

Nel luglio 1995 il gravimetro superconduttore T015 è stato inserito nel progetto *Global Geodynamics Project*. Il *Global Geodynamics Project* è un progetto nato al fine di monitorare variazioni del campo gravitazionale terrestre su un periodo che varia fra un secondo ed alcuni anni. In questo arco di tempo gli istituti facenti parte del progetto dovranno porre in stazione permanentemente un gravimetro superconduttore, e verificare periodicamente il valore della gravità assoluta del sito per mezzo di un gravimetro assoluto [14].

Allo stato attuale dei lavori si prevede che faranno parte del progetto circa una quindicina di stazioni sparse su tutto il globo, come mostrato in Fig.11.



Le finalità della ricerca sono quelle di dare risposta ai seguenti quesiti di geodinamica tuttora irrisolti:

- Esistono onde gravitazionali all'interno del nucleo liquido; gli effetti di tale fenomeno sono rilevabili in superficie mediante gravimetri superconduttori?
- Valutazione dell'effetto gravitazionale sulla terra solida del carico atmosferico globale e della redistribuzione di masse.
- Miglioramento della stima dell'effetto del carico oceanico sulla terra solida, mediante analisi di marea su dati globali; stima dell'effetto dovuto al *diurnal free wobble*.

- d) Misura delle variazioni della gravità associate ad alcuni fenomeni geodinamici, come terremoti lenti e silenziosi, movimenti tettonici, variazioni del livello dei mari e *rimbalzo post glaciale*.
- e) Registrazione degli effetti collegati con la posizione del polo dell'asse di rotazione terrestre ad una frequenza di alcuni minuti.
- f) Supporto per la misura della gravità assoluta su scala globale.

Per agevolare lo scambio dei dati di gravità derivanti dalle registrazioni dei gravimetri superconduttori della rete globale è stata implementata una banca dati collegata in rete *INTERNET*.

Tale banca dati si trova presso l'*ICET (International Center of Earth Tide)*, a Bruxelles, ed è attualmente gestita da ricercatori dell'*Observatoire Royal de Belgique*.

Il programma finale del progetto *GGP* prevede la raccolta e la registrazione su *CD ROM* dei dati delle stazioni facenti parte della rete per una durata di almeno 3 anni a partire dal Luglio 1997.

Tutti i membri del progetto sono pertanto obbligati a far pervenire a tale banca dati gli osservabili a loro disposizione convertiti in un formato internazionale di scambio, che è stato deciso dal direttivo del progetto essere il formato di *input* del programma *PRETERNA*.

5 - BIBLIOGRAFIA.

- [1] Goodkind, J.H., *Cahiers du Centre Europeen de Geod. et de Seism.*, 3, 81 (1990).
- [2] Ragunì, G., *Tesi di laurea in fisica*, (1992).
- [3] Achilli, V., Baldi, P., Casula, G., Errani, M., Focardi, S., Guerzoni, Palmonari, F., M., Ragunì, G., *Bull. Geod.* 69, 73 (1995).
- [4] Baldi, P., Casula, G., Focardi, S., Palmonari, F., Cerutti, G., De Maria, P., Marson, I., *Gravity and Geoid*, Springer, Berlino, 27 (1995).
- [5] Melchior, P., *The tide of the planet Earth*, Pergamon Press, (1983).
- [6] Baldi, P., Casula, G., Focardi, S., Palmonari, *Ann. di Geofis.*, 2, 301 (1995).
- [7] Schwidersky, E., *Geoph. Sp. Phys.*, 18, 243 (1980).
- [8] Wenzel, H.G., *Bull. Inf. Marées Terr.*, 118, 8722-8734, Bruxelles (1994).
- [9] Doodson, A.T., *International Hydrographic Revue*, 31, 306-328, London (1921).
- [10] Cartright, D.E., Tayler R.J., *The Geophysical Journal*, 23, 1, Oxford (1971).
- [11] Bullesfeld, F.J., *Deutsche Geodatische Kommission*, C, 314, Munchen (1985).
- [12] Tamura, Y., *Bull. Inf. Marees Terr.*, 99, 6813-6855, Bruxelles (1987).
- [13] Dehant, V., *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49, 97-116, 1987.
- [14] Crossley D., Hinderer J., *Cahiers du Centre Europèen de Gèodynamique et de Sèismologie*, 11, 244-271 (1994).