

Individuazione di cavità sotterranee con metodi gravimetrici

G. BERRINO *, F. CAPUOZZO **, P. MIRAGLINO ***, G. LUONGO *

SOMMARIO: La presenza di cavità nel sottosuolo, specie se superficiali, pone spesso problemi, anche notevoli, nella realizzazione di opere di Ingegneria Civile ed è sovente causa di gravi dissesti; pertanto la loro individuazione è un presupposto indispensabile e per la minimizzazione dei rischi derivanti dalla loro presenza, e per una ottimale programmazione dell'utilizzo del territorio. La ricerca di cavità sotterranee può essere effettuata sia con metodi diretti (perforazioni) sia con metodi indiretti basati su indagini di tipo geofisico. Questi richiedono molto spesso l'energizzazione del terreno e ciò ne rende difficoltoso l'impiego in aree densamente urbanizzate e, laddove vengono indotte vibrazioni (metodi sismici), possono provocare dissesti in strutture già in condizioni precarie di equilibrio. D'altra parte l'utilizzo dei metodi diretti è sempre oneroso soprattutto per i costi che comporta, per cui è opportuno limitarlo solo a quelle aree circoscritte dove è nota la presenza di cavità, in seguito a documentazione storica, o dove i dati disponibili sul territorio mostrano che nel sito in esame la probabilità di rinvenire una cavità è elevata. Risulta, pertanto, di particolare interesse la scelta di una metodologia che, senza richiedere energizzazione del terreno, permetta di individuare tali aree e di valutare la volumetria e la profondità dei vuoti, riservando ai metodi diretti il compito di definirli. L'attuale disponibilità di strumenti di adeguata sensibilità e molto maneggevoli, e la possibilità di impiegare sofisticate metodologie di calcolo per il trattamento dei dati, suggeriscono che le prospezioni gravimetriche, basate sul rilevamento e l'analisi delle variazioni di gravità prodotte dalla presenza di cavità, possono essere utilmente impiegate per l'individuazione di queste.

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di una prospezione gravimetrica campione effettuata in una zona dell'area urbana napoletana dove è presente un vuoto del quale si conosce, almeno nelle sue linee generali, la geometria. La scelta di una cavità nota è stata imposta dalla necessità di confrontare i risultati ottenuti dal rilevamento con la reale situazione e valutare la validità del metodo in tale problematica. I risultati di tale studio sono stati particolarmente incoraggianti rivelando come il metodo proposto possa apportare sostanziali contributi nella individuazione di cavità sotterranee.

1. Premessa

Una corretta pianificazione del territorio impone, tra l'altro, la conoscenza degli elementi geologici che ne caratterizzano il sottosuolo, per evitare una non idonea strutturazione del tessuto urbano e di ogni altra opera di Ingegneria Civile; tale conoscenza non può essere conseguita senza tener conto dei fenomeni che hanno determinato le caratteristiche delle rocce e dei terreni presenti nella zona.

Lo studio del sottosuolo è attualmente argomento di estremo interesse, anche per la minimizzazione dei rischi geologici, per cui ogni metodologia che si mostri utile all'ampliamento delle conoscenze su di esso riveste un'importanza, oltre che di carattere scientifico, soprattutto di carattere applicativo e sociale. Si deve rammentare, infatti, e ciò è d'altronde ben noto a chi si interessa dell'uso o della gestione del territorio, che gli interventi in superficie normalmente non sono preceduti da un adeguato studio del sottosuolo e spesso la mancanza di queste conoscenze determina scelte economica-

mente errate. È noto, inoltre, come infrastrutture ed interi complessi edilizi hanno raggiunto costi elevati per far fronte a situazioni sfavorevoli venute alla luce solo in caso di realizzazione del progetto. L'acquisizione a tempo debito di informazioni sul sottosuolo avrebbero consigliato la scelta di un sito con minori problemi tecnici e quindi con minore impegno di risorse.

In molte aree, sia per cause naturali che per opera dell'uomo, sono presenti cavità sotterranee, con forme, dimensioni e distribuzione estremamente variabili, la cui presenza condiziona, in modo spesso determinante, le caratteristiche di stabilità del sottosuolo potendosi determinare situazioni tali da creare gravissimi ostacoli alla realizzazione di un corretto sviluppo urbanistico e anche condizioni di pericolosità per strutture già esistenti. Pertanto, una conoscenza quanto più dettagliata possibile di tali cavità si rende necessaria sia per evitare che condizioni inizialmente stabili vengano meno, in seguito alle modificazioni delle sollecitazioni dovute all'incremento dell'urbanizzazione, sia per programmare tutti gli interventi necessari per una maggiore sicurezza. Va inoltre tenuto presente che cavità aventi particolari requisiti potrebbero essere utilizzate, dopo i necessari interventi, per sottoservizi e ciò è certamente non trascurabile in zone altamente urbanizzate dove la carenza di spazi utili è particolarmente sentita.

* Dott. Giovanna BERRINO, Prof. Giuseppe LUONGO, Istituto di Geologia e Geofisica, Facoltà di Scienze M.F.N., Università di Napoli.

** Dott. Federico CAPUOZZO, ENEL Distretto Campania-Servizio Tecnico, Napoli.

*** Dott. Paola MIRAGLINO, Geologo dell'Ufficio Sottosuolo, Comune di Napoli.

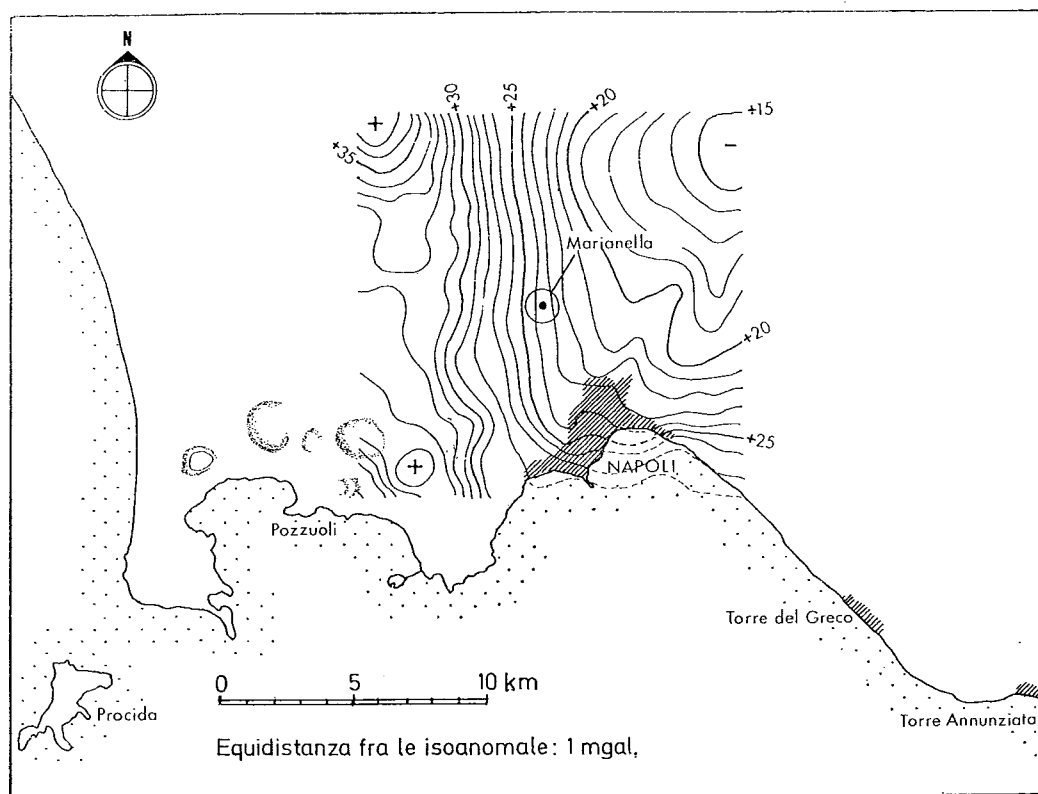


Fig. 1. - Localizzazione dell'area del rilevamento e relativo campo dell'anomalia di gravità (da MAINO *et al.* [1963] modificata).

La ricerca ed il rilevamento di cavità può essere eseguito sia con metodi diretti (trivellazioni e rilevamenti topografici) che indiretti, questi ultimi basati prevalentemente su indagini di tipo geofisico. I metodi indiretti possono consentire di individuare le aree in cui è altamente probabile la presenza di vuoti, lasciando a quelli diretti, che comportano notevoli impegni di personale e costi, il compito di rilevarne la geometria. Le due metodologie sono complementari in quanto la prima, a carattere più estensivo, può indirizzare le indagini dirette con notevole ottimizzazione di costi e tempi. Tuttavia i metodi indiretti che prevedono energizzazione del terreno risultano spesso di difficile impiego, in quanto, oltre ad essere di applicazione estremamente difficoltosa in aree densamente urbanizzate, possono produrre, soprattutto quelli che inducono vibrazioni, la rottura di equilibri già precari; pertanto in tali casi sono preferibili i metodi che non richiedono energizzazione del terreno. Tra questi, quello gravimetrico risulta di particolare interesse; tentativi in tal senso sono già stati effettuati [COLLEY, 1963; NEUMANN, 1967] ma solo recentemente si sono rese disponibili strumentazioni da campagna ad elevata sensibilità ed adeguati

procedimenti analitici per il trattamento dei dati, il che rende tale metodologia idonea ad evidenziare difetti di massa nel sottosuolo anche di limitata entità.

La città di Napoli ben si presta come area test per una valutazione delle potenzialità della metodologia indicata sia per la presenza di innumerevoli cavità, prodotte prevalentemente da attività estrattive in sottosuolo di materiale da costruzione, sia per la densa copertura urbana che insiste al di sopra delle cavità; è stata pertanto scelta una zona (Fig. 1) localizzata a Nord del centro urbano, dove è presente una cavità della quale è nota, almeno nelle linee generali, la geometria. In tale area è stata effettuata una prospezione gravimetrica i cui risultati hanno permesso di valutare l'efficacia del metodo in tale problematica.

2. Caratteristiche del sottosuolo di Napoli

La costituzione del sottosuolo della città di Napoli è legata prevalentemente all'attività del complesso vulcanico dei Campi Flegrei, localizzato ad Ovest di Napoli e coprente un'area di 400 km².

La massima parte dei prodotti vulcanici è di natura piroclastica mentre la presenza di lave è molto limitata; l'attività esplosiva flegrea è conseguente all'interazione magma-acqua ed eventi eruttivi senza la componente idromagmatica sono estremamente rari.

La formazione predominante prodotta da tale tipo di attività è un tufo, detto « tufo giallo napoletano », che è la più diffusa ed importante tra le formazioni piroclastiche presenti nella zona urbana e, per le sue caratteristiche tecniche, ha influito notevolmente sullo sviluppo urbanistico della città. Questo prodotto è costituito da una massa cineritica e sabbiosa con inclusi lapilli, pomici e scorie varie ed in esso si riscontrano passaggi graduali, verticali e laterali, tra la facies litoide e quella incoerente che si trova nelle parti superficiali della formazione; per più ampie informazioni sulle caratteristiche geologico-tecniche si rimanda a EVANGELISTA *et al.* [1980].

La roccia è facilmente cavabile e lavorabile, per cui, sin dall'antichità, è stato il materiale da costruzione più adoperato; la facilità di scavo ha inoltre permesso la realizzazione, fin da epoca remota, di opere in sotterraneo quali acquedotti, gallerie, fognature. Infatti il sottosuolo di Napoli già da oltre 5.400 anni è stato interessato da interventi dell'uomo come testimoniato dalla scoperta di tombe eneolitiche nella zona di Materdei; successivamente è stato oggetto di scavi da parte dei Greci e dei Romani che costruirono rispettivamente gli acquedotti della « Bolla » e « Claudio » convoglianti le acque del fiume Serino alla città. L'intensa richiesta di pietra da costruzione portò, in seguito, alla creazione di nuove cavità; la coltivazione delle cave veniva spinta fino a breve distanza dal tetto della formazione, allorché si avvertiva il cambiamento delle caratteristiche della roccia. Anticamente si procedeva scavando gallerie a cielo piano e pareti poco inclinate, dal 1860 in poi le volte sostituirono il cielo piano e le pareti diventarono di conseguenza accentuatamente paraboliche. Gli scavi procedevano in orizzontale prevalentemente secondo due direzioni quasi ortogonali fra loro, in modo da lasciare una serie di pilastri a sostegno delle volte e della sovrastante coltre di rocce sciolte; spesso lo scavo veniva spinto fino a raggiungere condizioni con ridotti margini di sicurezza [COMMISSIONE DI STUDIO - COMUNE DI NAPOLI, 1967; EVANGELISTA *et al.*, 1980].

Il maggior numero di cavità sono state abbandonate senza adottare alcuna precauzione

e frequentemente al loro interno si sono verificati dissesti il cui effetto si risente spesso anche in superficie, ponendo problemi di notevole complessità nell'utilizzazione del territorio e del suo sottosuolo. Appare evidente, quindi, come sia importante conoscere, nel modo più dettagliato ed ampio, l'ubicazione e la geometria di tali vuoti per poter non solo ridurre al minimo le limitazioni derivanti dalla loro presenza, ma in più valutare la possibilità di un loro utilizzo.

3. Principi del metodo gravimetrico

L'accelerazione di gravità g , in ogni punto P situato sulla superficie della Terra, adottando per questa un modello rappresentato da un ellissoide a due assi privo al suo interno di variazioni orizzontali di densità, è data dalla relazione:

$$g_c(\varphi) = g_e(1 + c_1 \sin^2 \varphi + c_2 \sin^2 2\varphi) \quad (1)$$

dove φ è la latitudine geografica del punto considerato e g_e è la gravità all'equatore.

In tale formula, detta « della gravità normale », i valori delle costanti c_1 e c_2 dipendono dal modello di Terra scelto; nella Formula Internazionale (I.U.G.G., 1930), tali valori sono $g_e = 978.049$ gal⁽¹⁾, $c_1 = 0.0052884$, $c_2 = -0.59 \times 10^{-5}$.

Ricerche successive, basate anche sullo studio delle orbite dei satelliti artificiali, suggeriscono invece i seguenti valori [CAPUTO, 1976]: $g_e = 978.03090$ gal, $c_1 = 0.005302$, $c_2 = -0.5825 \times 10^{-5}$.

Dalla relazione (1), differenziando rispetto a φ , si ottiene:

$$dg = g_e(2c_1 \sin \varphi \cos \varphi + 4c_2 \sin 2\varphi \cos 2\varphi) / d\varphi \quad (2)$$

che permette di calcolare, mediante integrazione, la variazione di gravità Δg corrispondente ad una variazione di latitudine $\Delta \varphi$.

Sulla superficie terrestre la gravità varia in funzione della quota del punto P e della morfologia ad esso circostante. Riducendo, mediante opportune correzioni, i valori misurati alla superficie di riferimento (ellissoide), e confrontandoli con quelli calcolati mediante la relazione (1), si rilevano delle differenze, definite « anomalie di gravità », che sono legate a disomo-

(1) 1gal = 1 cm/sec². Più frequentemente, nelle prospezioni gravimetriche, vengono usati i sottomultipli: 1mgal = 10^{-3} gal; 1 μ gal = 10^{-6} gal.

geneità nella distribuzione di massa al di sotto della superficie di riferimento.

La misura delle differenze di gravità Δg esistenti tra i vari punti di un'area interessata da un rilevamento, vengono effettuate con strumenti detti « gravimetri »; per una descrizione della teoria e delle caratteristiche costruttive dei vari tipi di gravimetri si rimanda all'ampia bibliografia esistente [GRANT, WEST, 1965; MORELLI, 1968; SAZHINA, GRUSHINSKY, 1971; TELFORD *et al.*, 1978].

Gli attuali gravimetri da prospezione hanno una sensibilità dell'ordine di 10^{-5} - 10^{-6} gal/div. È comunque da rilevare che l'incertezza sulla misura è alquanto maggiore (a volte anche di un ordine di grandezza) della sensibilità strumentale, a causa di sorgenti di errore (deriva strumentale, vibrazioni del suolo dovute a fattori meteorologici, agitazione del mare, traffico) il cui effetto può solo essere attenuato ma mai completamente eliminato.

Va inoltre tenuto presente che, nel corso di operazioni di misura nelle varie stazioni, le letture strumentali sono influenzate da effetti connessi sia alla meccanica dello strumento (deriva) sia all'attrazione luni-solare (effetto mareale); di tali influenze, funzioni del tempo, va tenuto conto nella misura delle differenze di gravità esistenti fra i punti di misura. I moderni gravimetri presentano in generale derivate abbastanza regolari su intervalli di tempo non molto lunghi (alcune ore), mentre l'effetto mareale può essere facilmente computato in quanto è nota con ottima precisione la sua legge di variazione temporale.

Le correzioni da apportare ai valori di gravità misurati, al fine di ridurli alla stessa superficie di riferimento, non necessariamente coincidente con quella dell'ellissoide, e poterli successivamente confrontare, sono:

a) Correzione d'altezza.

Tiene conto delle diverse quote dei punti di misura; essa si computa mediante la relazione:

$$\Delta g_F = (k_1 + k_2 \cos^2 \varphi) h + k_3 h^2 \quad (3)$$

dove h è la quota della stazione (m) rispetto alla superficie di riferimento e k_1 , k_2 e k_3 sono costanti che assumono rispettivamente i valori: $k_1 = 0.30855$, $k_2 = -22 \times 10^{-5}$, $k_3 = 144 \times 10^{-6}$ e che forniscono il valore di Δg_F espresso in mgal.

b) Correzione di piastra.

Tale correzione è necessaria per tener conto delle masse interposte tra il punto stazione supposto su un piano orizzontale di quota h e la superficie di riferimento. La relazione utilizzata per tale riduzione è:

$$\Delta g_B = C_B \rho h \quad (4)$$

dove ρ è la densità media (g/cm^3) dei materiali presenti fra la stazione e la superficie di riferimento e $C_B = 0.04191$.

Per l'applicazione di tale correzione, che risulta anch'essa espressa in mgal, è necessaria una notevole oculatezza nella scelta della densità media, scelta che va fatta soprattutto sulla base di un attento esame geologico dell'area in cui si effettuano i rilievi.

c) Correzione topografica.

Quando una stazione si trova in un'area a superficie non pianeggiante, è necessaria una correzione additiva che tenga conto dello scostamento Δh di ogni punto della superficie topografica da quella di un piano orizzontale di quota h ; tale correzione, sempre positiva, viene calcolata, in funzione dei dislivelli esistenti tra il punto stazione e le zone circostanti, utilizzando o relazioni analitiche o tabelle appositamente predisposte.

Per un'ampia trattazione dei metodi di prospezione gravimetrica, si rimanda a GRANT, WEST [1965]; MORELLI [1968]; SAZHINA, GRUSHINSKY [1971]; TELFORD *et al.* [1978].

In definitiva, il valore δg dell'anomalia di gravità nel punto P sarà uguale a:

$$\delta g(P) = g_o(P) + \Delta g_F - \Delta g_B + \Delta g_T - g_c(P) \quad (5)$$

L'insieme dei valori δg definiti dalla (5) nei vari punti, è rappresentabile mediante una mappa a curve di livello dette « isoanomale », costituisce il campo dell'anomalia di gravità derivante da disomogeneità orizzontali, esistenti al di sotto della superficie di riferimento, nella distribuzione di massa.

4. Rilevamento gravimetrico

Nella zona interessata dal rilevamento è presente una cavità (Fig. 2) con un volume di circa 78.000 m^3 , un'altezza media di m 13 ed il tetto a profondità variabile da 22 a 29 m; per le sue caratteristiche può costituire un campione abbastanza rappresentativo dei vuoti presenti nell'area urbana di Napoli.

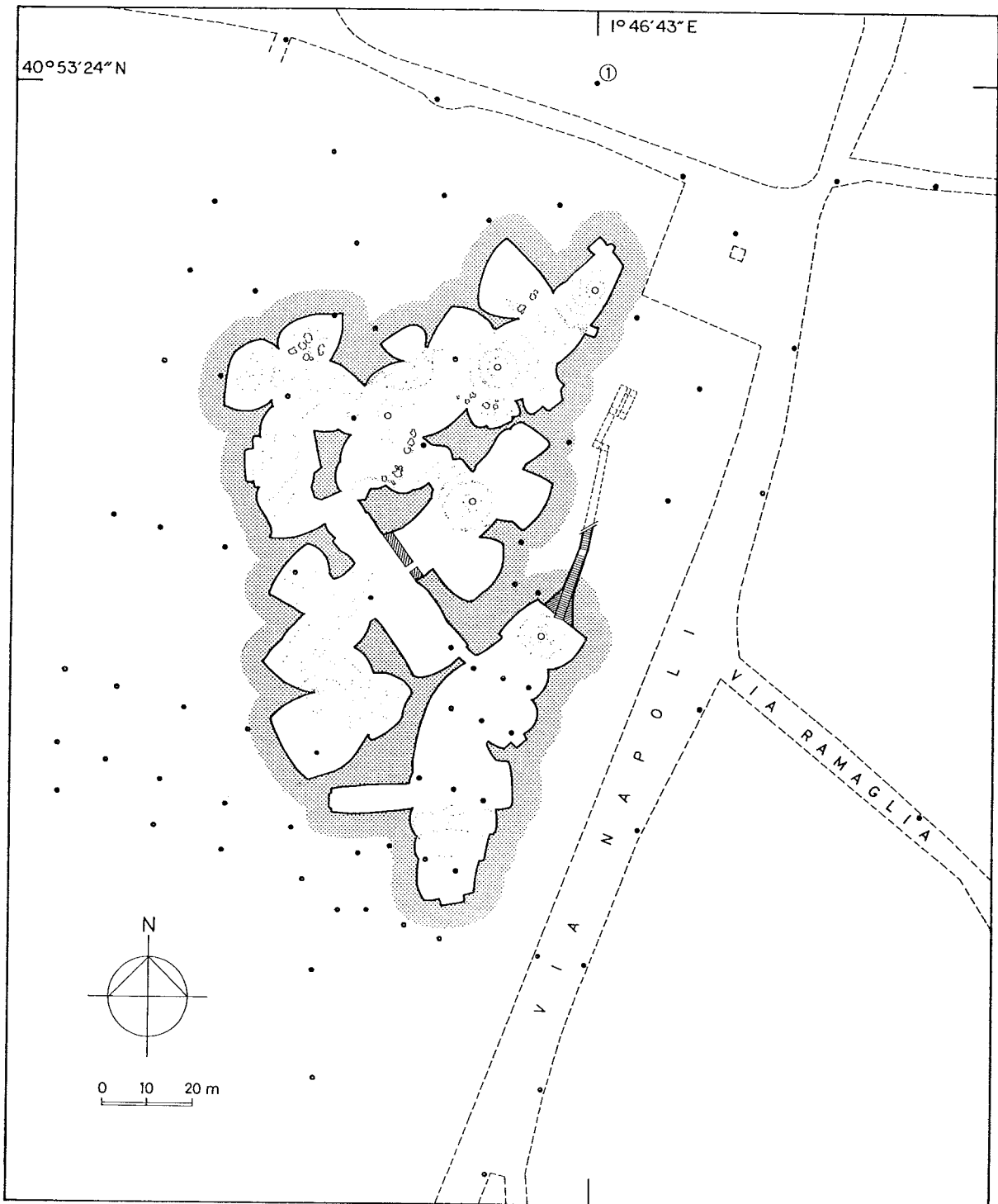


Fig. 2. - Pianta della cavità e punti stazione.

Dopo una preventiva ricognizione della zona si è proceduto alla scelta e materializzazione dei punti stazione che, considerata la geometria abbastanza complessa della cavità, sono stati posti mediamente ad una distanza di circa 15 m l'uno dall'altro e con una distribuzione quanto più uniforme possibile, nei limiti consentiti dall'urbanizzazione della zona, in modo

da ottenere un'individuazione abbastanza dettagliata dell'anomalia prodotta. La loro localizzazione è stata effettuata sulla base di una carta topografica in scala 1:500, operativamente disponibile; l'area coperta dal rilevamento è di circa 21.000 m² con un totale di 80 stazioni (Fig. 2).

Prioritariamente si è proceduto alla determi-

nazione delle quote dei punti stazione, la cui conoscenza è necessaria per la riduzione delle misure gravimetriche che sono state successivamente effettuate; come stazione di riferimento è stato scelto il caposaldo n. 207/115 del rilevamento gravimetrico, a carattere regionale, effettuato nell'area campana dal Servizio Geologico d'Italia [MAINO *et al.*, 1963]. Per tale caposaldo (n. 1) si ha: $\varphi = 40^{\circ}53'24''$; $\lambda = 1^{\circ}46'43''$ E M. Mario; $h = 148.545$ m; $g = 980,247.53$ gal (Fig. 2).

Le misure altimetriche sono state effettuate mediante livellazione geometrica dal mezzo, seguendo le norme suggerite dalla COMMISSIONE GEODETICA ITALIANA [1975], utilizzando livelli Zeiss Mod. NI2, e operando lungo circuiti chiusi, tra loro concatenati, per la successiva compensazione delle misure; la determinazione delle quote è risultata essere affetta da errore non superiore a 0.5 cm.

Le misure gravimetriche sono state fatte utilizzando il microgravimetro LaCoste & Romberg mod. D n. 62, avente campo di misura = 200 mgal e sensibilità circa 1 μ gal/div.

La costante di scala dello strumento è stata controllata sulla base di taratura Bologna-Ferrara [MARSON, MORELLI, 1978] ed il suo valore è risultato essere $c = 1.0736$ mgal/div, praticamente coincidente con quello fornito dalla Casa costruttrice; per una descrizione specifica delle caratteristiche di tale tipo di strumento si rimanda a HAMILTON, BRULÈ [1967], Mc CONNEL *et al.* [1974].

Le misure sono state condotte seguendo modalità operative atte a minimizzare gli errori di osservazione [BICHARA *et al.*, 1981] e procedendo lungo circuiti chiusi, allo scopo di valutare e quindi eliminare l'effetto della deriva strumentale; per il calcolo, e la successiva eliminazione, degli effetti causati dall'attrazione luni-solare, che possono ammontare anche a qualche decina di microgal, sono state utilizzate le formule di LONGMAN [1959] assumendo per il fattore gravimetrico il valore medio di 1.16 [DUCARME *et al.*, 1978]; l'errore standard sulle differenze di gravità tra le stazioni è risultato di ± 10 μ gal.

Il rilevamento completo dell'area, effettuato da una squadra topografica ed una gravimetrica, ha comportato 7 giorni di campagna. Per l'individuazione dell'anomalia prodotta dalla cavità in studio, è stato necessario ridurre i valori di gravità misurati ad una superficie di riferimento situata a quota inferiore al tetto della cavità stessa; come piano di riferimento

è stato scelto quello passante per il caposaldo n. 1, la cui quota è stata assunta come zero relativo.

Le correzioni apportate sono state quella di altezza, di piastra, nella quale è stato adottato per la densità il valore di 1.6 g/cm³, valore medio relativo ai prodotti presenti in zona per i quali la densità varia in un intervallo di 1.2-1.8 g/cm³ [EVANGELISTA *et al.*, 1980], e di latitudine; per quest'ultima il gradiente, calcolato mediante la (2), è risultato di 8 μ gal/10 m. Non è stato necessario apportare la correzione topografica in quanto, stante la morfologia e la limitata estensione dell'area indagata, essa risulta trascurabile per le finalità del presente rilievo.

La mappa delle anomalie $\delta g(x, y)$ così ottenuta, costruita con equidistanza tra le isolinee di 25 μ gal, è riportata in fig. 3.

5. Analisi e discussione dei risultati

Il campo dell'anomalia di gravità (Fig. 3) mostra una diminuzione da W verso E passando da valori positivi di circa 175 μ gal a valori negativi di circa -125 μ gal.

Ai bordi dell'area investigata il campo si presenta abbastanza regolare, mentre nella parte centrale è più accidentato, con valori negativi, con un minimo assoluto in corrispondenza della cavità e dove questa presenta una maggiore altezza ed è più prossima alla superficie. Altre due aree di minimo, inoltre, sono presenti nei quadranti NW e NE dell'area.

Il quadro generale suggerisce che l'anomalia locale, sovrapposta ad un campo di fondo prodotto dalle strutture geologiche a carattere regionale e più profonde, possa attribuirsi alla presenza della cavità. Per l'individuazione del campo dell'anomalia di gravità nell'area napoletana MAINO *et al.* [1963] (Fig. 1). L'area in studio è caratterizzata da un gradiente costante in direzione EW di -2 μ gal/m (Fig. 4) e nullo in direzione NS; tale campo è stato sottratto dai valori dell'anomalia, ottenendosi così l'anomalia residua $\delta g(x, y)$ riportata in fig. 5, ed imputabile praticamente alla sola cavità. L'anomalia delimitata dalla isoanomala zero presenta un'estensione circa tripla della superficie occupata dalla cavità, con un valore minimo assoluto di -200 μ gal che ricade nella stessa zona di maggior altezza della cavità e dove la volta di questa si avvicina maggiormente al piano campagna. L'andamento delle isolinee segue nelle linee generali i contorni del vuoto presentando nella parte orientale un infittimen-

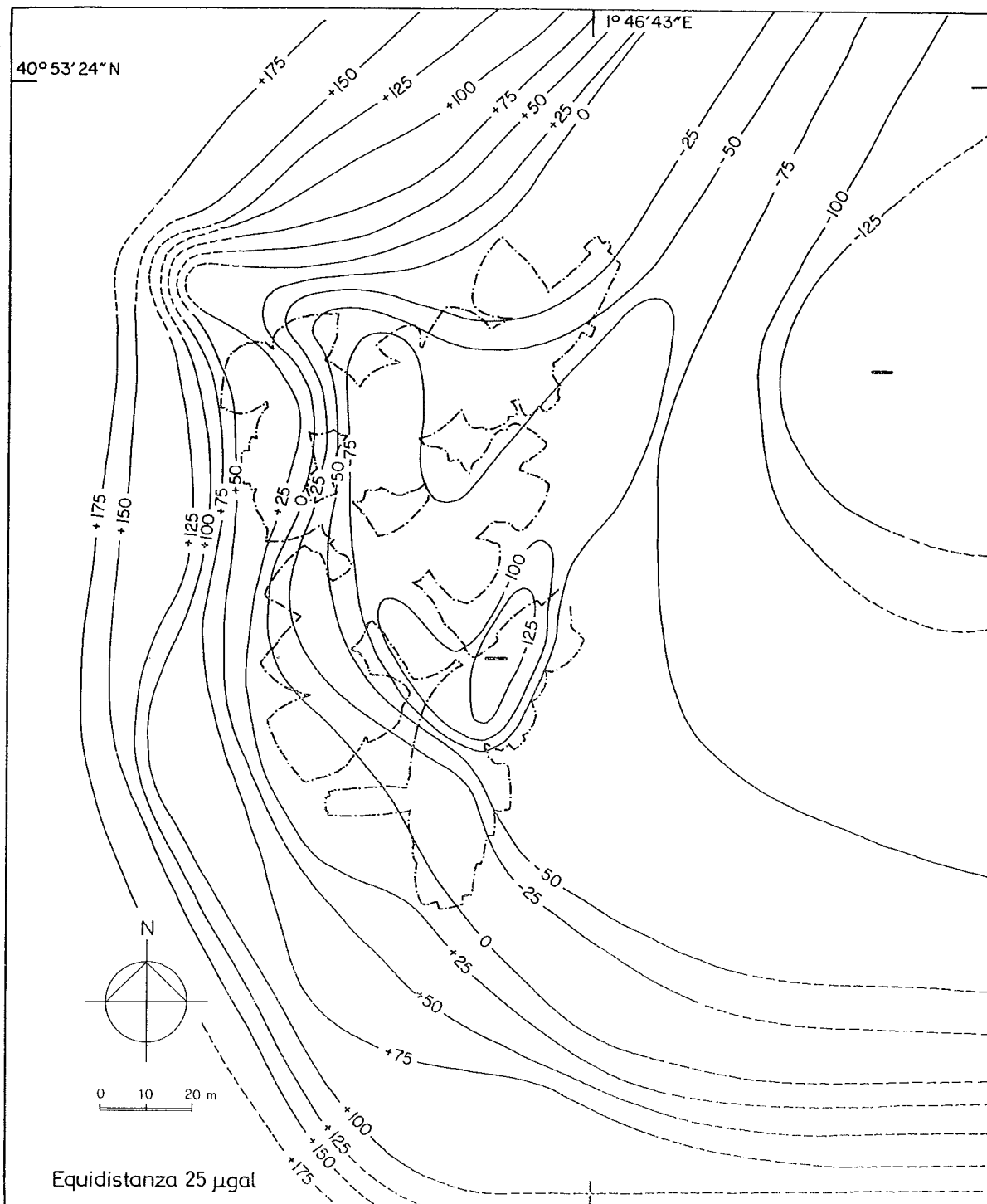


Fig. 3. - Mappa dell'anomalia di gravità.

to in corrispondenza di una parete di questo avente uno sviluppo più regolare delle altre, mentre nella parte NW si accentua un minimo, già osservabile nella mappa di fig. 3 e attribuibile verosimilmente ad un prosiegno non noto del vuoto, così come quello, di entità minore, presente nella parte SE.

È da tener presente che la cavità in studio

non è completamente vuota, ma in essa sono presenti i pilastri lasciati a sostegno della volta e anche materiali di risulta che portano il volume di vuoto effettivo ad un valore di circa 55.000 m³, corrispondente ad un difetto di massa di circa 10¹¹ g.

La conoscenza del campo $\delta g(x, y)$ dell'anomalia permette, mediante l'utilizzo del teorema

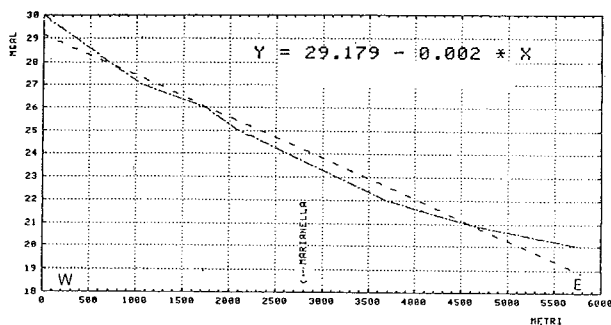


Fig. 4. - Gradiente del campo di fondo lungo la direzione W-E.

di Gauss, di valutare il difetto M di massa [GRANT, WEST, 1965]:

$$M = \frac{1}{2\pi G} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta g(x, y) dx dy \quad (6)$$

dove $G = 6.673 \times 10^{-8}$ è la costante di gravitazione universale. Il calcolo dell'integrale che compare nella (6) è stato effettuato per via numerica [HILDEBRAND, 1967], assumendo come dominio di integrazione l'area racchiusa dall'isoanomala zero e dopo aver digitalizzato la mappa di fig. 5 su una maglia di 20 m di lato. È risultato per M il valore di 7.8×10^{10} g, corrispondente ad un vuoto di 4.9×10^{10} cm³ (49.000 m³), assumendo per la densità ρ del tufo il valore di 1.6 g/cm³.

Le coordinate \bar{x} ed \bar{y} , sulla superficie di riferimento, del baricentro di M sono state determinate utilizzando le relazioni [GRANT, WEST, 1965]:

$$\bar{x} = \frac{1}{2\pi GM} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \delta g(x, y) dx dy \quad (7a)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{2\pi GM} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y \delta g(x, y) dx dy \quad (7b)$$

che, con il medesimo procedimento utilizzato per il calcolo della (6), hanno fornito i seguenti valori:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 108 \text{ m} \\ \bar{y} &= 48 \text{ m} \end{aligned}$$

con l'origine degli assi posizionata nel caposaldo 1, l'asse x assunto positivo verso Sud e l'asse y positivo verso Ovest.

Tenendo conto di tali risultati e della forma e dimensioni dell'anomalia, si è effettuata l'inversione di quest'ultima mediante un modello costituito da un corpo di forma parallelepipedica, avente le dimensioni $100 \times 38 \times 13$ m (volume: 49.000 m³), con il centro posto nel punto di coordinate \bar{x} e \bar{y} ed alla profondità z_0 di 32 m, ed avente la dimensione maggiore orientata in direzione NNE-SSW; il valore di z_0 è stato determinato in funzione della distanza media dal punto C_0 (\bar{x} , \bar{y}) (Fig. 5), alla quale l'anomalia si dimezza [SAZHINA, GRUSHINSKY, 1971].

Il calcolo dell'anomalia prodotto da tale corpo è stato effettuato mediante la relazione [GRANT, WEST, 1965]:

$$\delta g_c(x, y, z_0) = \frac{B_0^0 z_0}{R^3} + 3B_2^0$$

$$\begin{aligned} & [(3\cos^2\varphi - 1)z_0^3 + (5\sin^2\omega \sin^2\varphi - 2\cos^2\varphi - 1) \cdot \\ & \cdot x^2z_0 + (5\cos^2\omega \sin^2\varphi - 2\cos^2\varphi - 1) y^2z_0 - 2\sin\omega \cdot \\ & \cdot \sin\varphi \cos\varphi (x^3 + xy^2 - 4xz_0^2) + 2\cos\omega \sin\varphi \cos\varphi \cdot \\ & \cdot (y^3 + x^2y - 4yz_0^2) - 10\sin\omega \cos\varphi \sin^2\varphi (xyz_0)] / \\ & / 2R^7 + 3B_2^0 [-3\sin^2\varphi z_0^3 + (5\cos^2\omega + \\ & - 5\sin^2\omega \cos^2\varphi + 2\sin^2\varphi) \cdot \\ & \cdot x^2z_0 + (5\sin^2\omega - 5\cos^2\omega \cos^2\varphi + \\ & + 2\sin^2\varphi) y^2z_0 + 2\cos\omega \cdot \\ & \cdot \sin\varphi \cos\varphi (y^3 + x^2y - 4yz_0^2) + \\ & - 2\sin\omega \sin\varphi \cos\varphi (x^3 + xy^2 + \\ & - 4xz_0^2) + 10\sin\omega \cos\omega (1 + \cos^2\varphi) xyz_0] / R^7 \end{aligned}$$

dove:

$$B_0^0 = 8G \rho abc$$

$$B_2^0 = \frac{B_0^0 (2c^2 - a^2 - b^2)}{6}$$

$$B_2^0 = \frac{B_0^0 (a^2 - b^2)}{12}$$

con a , b e c le semidimensioni del corpo nel cui centro di massa è l'origine di una terna ortogonale avente gli assi orientati rispettivamente nelle direzioni di a , b e c ; ω e φ sono gli angoli che definiscono l'orientamento, rispetto a tale sistema, del riferimento nel quale vengono misurate le coordinate x , y e z_0 del punto dove viene calcolata l'anomalia.

Il campo dell'anomalia δg_c prodotta dal corpo ben si accorda con quello osservato δg , con uno scarto quadratico medio, tra i valori calcolati e quelli osservati, di $\pm 20 \mu\text{gal}$.

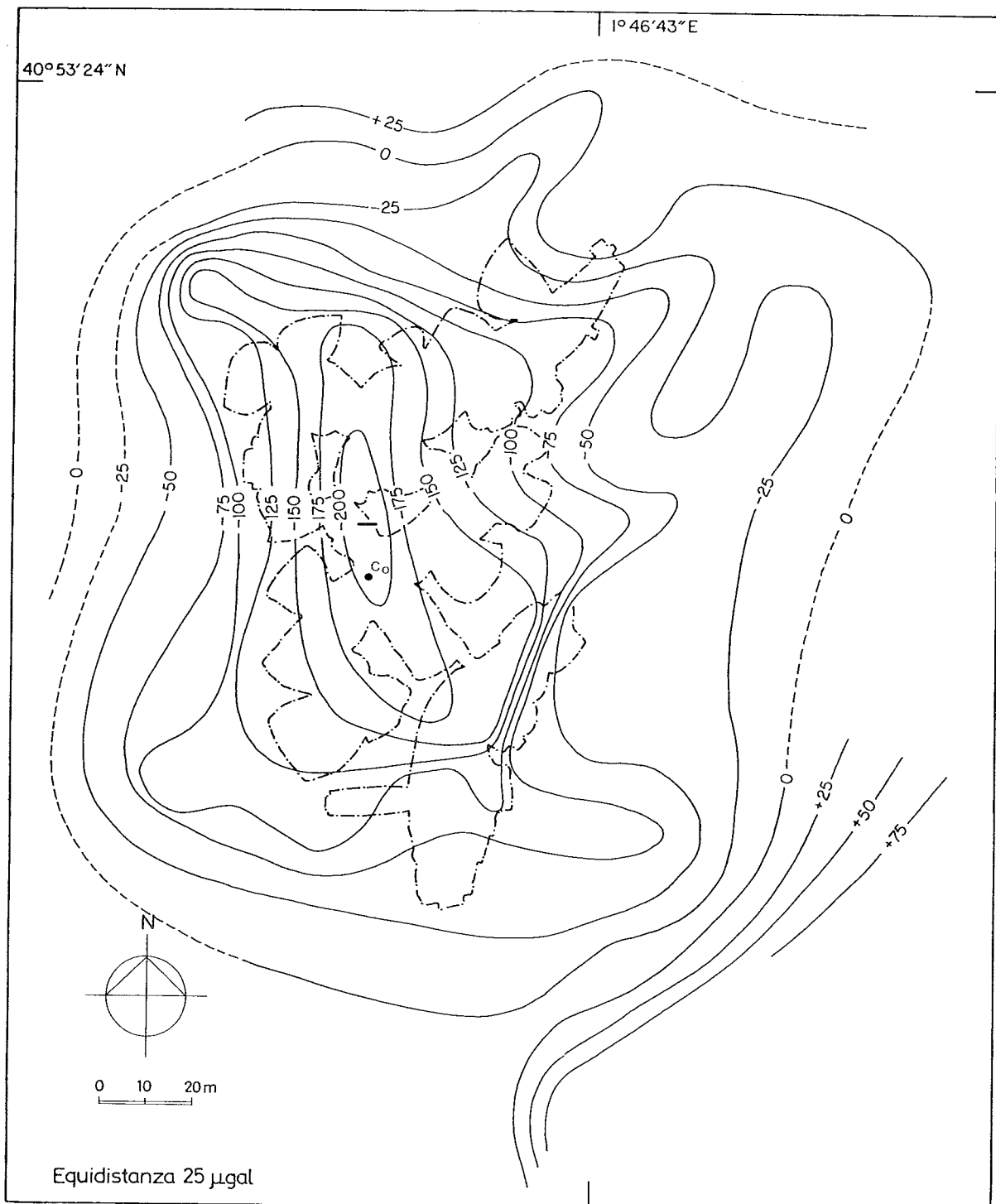


Fig. 5. - Mappa dell'anomalia residua. C_0 individua la posizione del baricentro di M.

6. Conclusioni

I risultati della prospezione gravimetrica di dettaglio applicata al caso in esame si sono rivelati particolarmente promettenti; infatti l'indagine sin qui condotta, certamente suscettibile di ulteriori sviluppi, ha mostrato la possibilità

di evidenziare l'anomalia associata alla presenza del vuoto sotterraneo e di delinearne con buon dettaglio le caratteristiche. È stato inoltre possibile, dalla geometria dell'anomalia, pervenire ad una modellazione attendibile della sorgente almeno nelle dimensioni.

La strumentazione utilizzata e le moderne

metodologie di analisi dei dati consentono di affrontare il problema dell'individuazione di vuoti anche di dimensioni sensibilmente inferiori a quelle della cavità oggetto del presente lavoro, e poiché il metodo usato non richiede energizzazione del terreno è applicabile anche in zone densamente urbanizzate. Questa tecnica di indagine avendo, inoltre, carattere estensivo permette di individuare le aree in cui è altamente probabile la presenza di cavità superficiali, il che riveste particolare importanza in ogni programma di utilizzazione del territorio, mostrando anche come sia possibile una valutazione dei volumi e della profondità di tali vuoti.

Si ritiene opportuno suggerire che utili contributi in tale ricerca possono essere forniti dall'analisi della distribuzione areale del gradiente verticale dg/dh della gravità, la cui valutazione è attualmente possibile con buona precisione grazie alla disponibilità di strumenti di elevata sensibilità e maneggevolezza, del tipo di quello usato nel presente studio [FAJKLEWICZ, 1976; AGER, LIARD, 1982].

La metodologia proposta a tal punto esaurisce il proprio compito lasciando ai metodi di indagine diretta, quali perforazioni e rilevamenti topografici di dettaglio, il compito di una più precisa localizzazione e definizione della geometria della cavità; si tratta di metodi di costo ed impegno di gran lunga più elevati, la cui applicazione, guidata da indagini gravimetriche, potrebbe raggiungere livelli ottimali sia per i costi che per i tempi di esecuzione.

BIBLIOGRAFIA

- AGER G. A., LIARD J. O. (1982) - *Vertical gravity gradient surveys: Field results and interpretation in British Columbia, Canada*. Geophysics, vol. 47, n. 6, pp. 919-925.
- BICHARA M., ERLING J. C., LAKSHMANAN J. (1981) - *Technique de mesure et d'interprétation minimisant les erreurs de mesures en microgravimétrie*. Geoph. Prosp., vol. 29, pp. 782-789.
- CAPUTO M. (1967) - *The gravity field of the Earth*. Academic Press, New York-London.
- COMMISSIONE GEODETICA ITALIANA (1975) - *Guida alla progettazione ed alla esecuzione delle livellazioni geometriche*. Boll. di Geod. e Scienze affini, anno XXXIV, n. 1.
- COMMISSIONE DI STUDIO - COMUNE DI NAPOLI (1967) - *Il sottosuolo di Napoli*.
- COLLEY G. C. (1963) - *The detection of caves by gravity measurements*. Geoph. Prosp., vol. XI, n. 1, pp. 1-10.
- DUCARME B., POITEVIN C., LOODTS J. (1978) - *Precise tidal corrections for high precision gravity measurements*. 8th Meeting of the International Gravity Commission, Paris, 12-16 Settembre.
- EVANGELISTA A., LAPEGNA U., PELLEGRINO A. (1980) - *Problemi geotecnici della città di Napoli per la presenza di cavità nella formazione del tufo*. Atti del XIV Convegno Nazionale di Geotecnica - Firenze.
- FAJKLEWICZ Z. J. (1976) - *Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms*. Geophysics, vol. 41, n. 5, pp. 1016-1030.
- GRANT F. S., WEST G. F. (1965) - *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill Book Company.
- HAMILTON A. C., BRULÉ B. G. (1967) - *Vibration induced drift in LaCoste & Romberg Geodetic Gravimeters*. Journ. of Geoph. Res., vol. 72, n. 8, Aprile, pp. 2187-2197.
- HILDEBRAND F. B. (1967) - *Analisi Numerica*. Casa Ed. Ambrosiana - Milano.
- LONGMAN I. M. (1959) - *Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun*. J. Geophy. Res., 64, pp. 2351-2355.
- MAINO A., SEGRE A. G., TRIBALTO G. (1963) - *Rilevamento gravimetrico dei Campi Flegrei e dell'isola d'Ischia*. Ann. Oss. Vesuv., vol. V, pp. 229-312.
- MARSON I., MORELLI C. (1978) - *First order gravity net in Italy*. Boll. Geod. e Scienze affini, anno XXXVII, n. 4.
- MC CONNEL R. K., HEARTY D. B., WINTER P. J. (1974) - *An evaluation of the LaCoste & Romberg model D microgravimeter*. 7th Meeting of the International Gravity Commission, Paris, 2-7 Settembre.
- MORELLI C. (1968) - *Gravimetria* - Del Bianco, Udine.
- NEUMANN R. (1967) - *La gravimétrie de haute précision, application aux recherches de cavités*. Geoph. Prosp., pp. 116-134.
- SAZHINA N., GRUSHINSKY (1971) - *Gravity Prospecting*. MIR publishers, Moscow.
- TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E., KEYS D. A. (1978) - *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.

SUMMARY

The detection of caves by gravity measurements.

Caves, if superficial particularly, raise a lot of problems, to realize works of Civil Engineering and they often cause serious ruins; so it is necessary to locate the caves in the underground in order to reduce risks coming from their presence and for the best town-planning. We can search caves either by drills or by indirect methods based on geophysical researches; for some of these latter we must give energy to the ground which makes difficult the use of it in densely inhabited areas and, when vibration are induced (seismic methods), they can provoke ruins in already unsafe stability conditions. Moreover, when direct methods are used, the costs are heavy and it is better to limit its use only in those areas where caves are very probably present. For this reason it is particularly interesting to find out a method, without any ground energy, by which we can locate such areas and obtaine reliable information about the volume and the deph of the caves to be subsequently defined by direct methods. At present we have very rightly sensitive instruments (microgravimeters) and can use sophisticate algorithms to process data which suggest that gravity survey are suitable to detect caves.

In this paper the results from a gravity survey, which has been carried out in Neapolitan test area (Fig. 1), where caves in the underground are present, are reported. The gravity survey, covering the area with 80 stations (Fig. 2), has been carried out using a LaCoste & Romberg mod. D, n. 62, gravity meter. After reductions of gravity data have been performed, a gravity anomaly has been obtained (Fig. 3) and, subtracting from it the regional field (Fig. 1, 4), only the anomaly due to the cave results (Fig. 5). The quantitative interpretation of the anomaly gives results in very good agreements with the already known characteristics of the cave and the obtained results appear particularly encouraging, showing a valuable method for underground caves detection.