



l'autore

FAUSTINO CETRARO

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO

Metodi geofisici di esplorazione del sottosuolo
Con il Software Sismic 2.0 scaricabile online

II EDIZIONE



**vai alla scheda
del libro**



**della stessa
collana**



 **EPC**
EDITORE

Come scaricare i contenuti digitali

1. accedi alla sezione **My EPC**

nel sito www.epc.it (inserisci le credenziali utilizzate per l'acquisto o effettua una nuova registrazione)



2. attiva il tuo **contenuto digitale**

- a) entra nella sezione **Contenuti digitali** cliccando su ***I tuoi contenuti digitali***
- b) inserisci il **codice etichetta** che si trova **qui sotto** e premi **Attiva**
- c) ne **La mia libreria** saranno attivi i contenuti predisposti per te, clicca su **Vedi contenuti** per visualizzarli o scaricarli

CODICE ETICHETTA

valido per scaricare il setup di **Sismic 2.0** e attivare il Software



Per informazioni e chiarimenti

Servizio assistenza 06 33245273 - tecnico@epclibri.it

Faustino Cetraro

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO

Metodi geofisici di esplorazione del sottosuolo

Con il Software Sismic 2.0 scaricabile online

II edizione

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO - II EDIZIONE

ISBN: 978-88-9288-180-8

Copyright © 2008-2022 EPC S.r.l. Socio Unico

EPC S.r.l. Socio Unico - Via Clauzetto, 12 - 00188 Roma - www.epc.it

Servizio clienti: Tel. 06 33245277/271 - clienti@epc.it

Redazione: Tel. 06 33245264/205

La traduzione, l'adattamento totale o parziale, la riproduzione o trasmissione in qualsiasi forma e/o con qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro (compresi i microfilm, i film, le fotocopie), nonché la memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), i diritti di noleggio e di prestito, sono riservati per tutti i Paesi.

L'Editore si dichiara pienamente disponibile a soddisfare eventuali oneri derivanti da diritti di riproduzione del materiale protetto dai diritti d'autore, di cui non sia stato possibile reperire gli aventi diritto. Ci scusiamo per eventuali omissioni e saremo lieti di inserire gli opportuni riconoscimenti nelle edizioni successive.

L'Editore declina ogni responsabilità per eventuali errori, refusi o inesattezze nonché per eventuali danni risultanti dall'uso delle informazioni presenti nel volume, pur curato con la massima diligenza e attenzione.



Il codice QR che si trova sul retro della copertina, consente attraverso uno smartphone di accedere direttamente alle informazioni e agli eventuali aggiornamenti di questo volume.

Le stesse informazioni sono disponibili alla pagina:

<https://www.epc.it/Prodotto/Editoria/Libri/INDAGINI-GEOFISICHE-del-suolo-con-software-SISMIC2/5152>

SOMMARIO

PREFAZIONE..... 13

PRIMA PARTE

FORMAZIONE, GEODINAMICA E STRUTTURA INTERNA DELLA TERRA

CAPITOLO 1

BREVI ACCENNI SUL SISTEMA TERRA..... 17

1.1 Origine e formazione della Terra 17

1.2 Concetto di geodinamica 19

1.3 Struttura interna..... 21

1.4 Campo gravitazionale 23

1.5 Campo magnetico..... 24

1.6 Bibliografia 26

PARTE SECONDA MINERALI E ROCCE

CAPITOLO 2

PROPRIETÀ DEI MINERALI E DELLE ROCCE..... 29

2.1 Generalità 29

2.2 Principali proprietà dei minerali 35

2.3 Influenza dei fattori geologici sulle rocce..... 35

2.4 Principali proprietà delle rocce 36

2.5 Bibliografia 39

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO

PARTE TERZA
METODI GEOFISICI DI ESPLORAZIONE DEL SOTTOSUOLO

CAPITOLO 3

PROSPEZIONE GRAVIMETRICA	43
3.1 Generalità	43
3.2 Strumenti di misura	45
3.3 Misure gravimetriche	48
3.4 Anomalia di gravità	49
3.5 Correzioni delle letture	51
3.6 Interpretazioni delle anomalie di gravità.....	54
3.6.1 Metodo diretto	54
3.6.2 Metodo indiretto.....	56
3.6.3 Effetto grafico di una sferica e di un cilindro	58
3.6.4 Effetto grafico di una lastra	59
3.6.5 Effetto grafico di un prisma rettangolare	61
3.6.6 Effetto grafico prodotto da più oggetti	62
3.6.7 Mappa delle anomalie di gravità	62
3.7 Bibliografia	64

CAPITOLO 4

PROSPEZIONE MAGNETOMETRICA	67
4.1 Basi del metodo.....	67
4.2 Anomalie magnetiche.....	69
4.3 Campo di riferimento geomagnetico internazionale.....	71
4.4 Correzioni diurne e altimetriche	71
4.5 Interpretazione delle anomalie magnetiche.....	72
4.5.1 Interpretazione diretta	72
4.5.2 Interpretazione indiretta	73
4.6 Strumenti da campo per le misure magnetiche.....	74

INDICE

4.6.1	Magnetometri a precessione protonica	75
4.6.2	Magnetometri Overhauser	76
4.6.3	Magnetometri a pompaggio ottico.....	77
4.6.4	Magnetometri a effetto Hall.....	77
4.6.5	Magnetometri Fluxgate.....	78
4.6.6	Magnetometri SQUID.....	80
4.6.7	Gradiometri	81
4.7	Rilevamento magnetico con droni.....	81
4.8	Profili e mappa delle anomalie magnetiche	82
4.9	Bibliografia	87

CAPITOLO 5

PROSPEZIONE GEOELETTRICA	89	
5.1	Concetti generali.....	89
5.2	Resistività apparente.....	94
5.3	Potenziali spontanei	96
5.3.1	Potenziale di mineralizzazione.....	96
5.3.2	Potenziale elettrocinetico e bioelettrico	98
5.3.3	Potenziale di diffusione	99
5.4	Configurazioni e cenni teorici sui sistemi di acquisizione tradizionali	100
5.4.1	Array di Wenner	100
5.4.2	Array di Schlumberger	101
5.4.3	Array del dipolo-dipolo.....	102
5.5	Attrezzature per la geoelettrica tradizionale	104
5.6	Programmazione delle indagini	105
5.7	Analisi e interpretazione con i metodi tradizionali	106
5.7.1	Metodo della corrispondenza delle curve.....	106
5.7.2	Metodo del punto ausiliario.....	108
5.7.3	Accenni al metodo di Tagg (1932).....	112

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO

5.8	Pseudo-sezioni orizzontali e verticali	113
5.9	Scelta della configurazione più adatta.....	116
5.10	Metodi di inversione	118
5.11	Elaborazione ed analisi dei modelli 1D	119
5.12	Elaborazione ed analisi dei modelli 2D	121
5.12.1	Pre-inversione e post-inversione.....	123
5.12.2	Modelli di calcolo in 2D	124
5.13	Profili geoelettrici nei pozzi	127
5.14	Cenni ai modelli di acquisizione in 3D	129
5.14.1	Elaborazione ed analisi dei modelli 3D	131
5.14.2	Modelli di calcolo in 3D	132
5.15	Bibliografia	135

CAPITOLO 6

PROSPEZIONE ELETTROMAGNETICA 139

6.1	Cenni teorici	139
6.2	Generalità dei metodi FDEM e TDEM	140
6.3	Metodo elettromagnetico nel dominio della frequenza	141
6.3.1	Rilievo e interpretazione delle misure	143
6.4	Metodo elettromagnetico nel dominio del tempo.....	146
6.4.1	Rilievo e acquisizione delle misure.....	147
6.4.2	Elaborazione e inversione dei dati	149
6.5	Indagini elettromagnetiche aviotrasportate	153
6.5.1	Sistemi AEM nel dominio della frequenza.....	154
6.5.2	Sistemi AEM nel dominio del tempo	156
6.6	Bibliografia	161

CAPITOLO 7

GEORADAR 165

7.1	Generalità	165
7.2	Misura e acquisizione del segnale	169

INDICE

7.3	Metodi di indagine	171
7.3.1	Common-Offset e Zero-Offset	171
7.3.2	Punto medio comune (CMP – <i>Common MidPoint</i>).....	173
7.3.3	Grandangolare (WARR, Wide Angle Reflection Refraction).....	175
7.3.4	Transilluminazione	175
7.4	Analisi ed elaborazioni dei dati.....	176
7.5	Interpretazione	179
7.6	Metodo d'indagine GPR applicato all'archeologia.....	180
7.7	Bibliografia	181

CAPITOLO 8

PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE	183	
8.1	Premessa	183
8.2	Tipologie di onde sismiche e strumenti di misura.....	183
8.3	Legge di Snell e principio di Huygens.....	186
8.4	Sismica a rifrazione classica.....	189
8.4.1	Metodi interpretativi	191
8.4.2	Livelli multipli in piani orizzontali	194
8.4.3	Superficie topografica irregolare.....	195
8.4.4	Livelli di separazione inclinati	196
8.4.5	Profili coniugati	197
8.4.6	Metodo del Plus-Minus Time.....	198
8.4.7	Metodo del reciproco generalizzato.....	201
8.5	Tecnica di rilevamento SASW.....	205
8.5.1	Misurazione in campo ed elaborazioni dei dati.....	206
8.6	Tecnica di rilevamento MASW.....	208
8.6.1	Principali fasi del metodo	209
8.6.2	Misure in campo.....	209
8.6.3	Analisi dei dati.....	210

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO

8.6.4	Procedura di inversione	212
8.7	Prospezione sismica in foro, Down Hole.....	214
8.7.1	Operazioni di rilevamento e acquisizione dei dati	214
8.7.2	Elaborazione dei dati	216
8.8	Prospezione sismica in foro, Cross Hole.....	218
8.8.1	Acquisizione e interpretazione dei dati	220
8.8.2	Cross Hole con tomografia sismica (CT).....	221
8.8.3	Cross Hole con Sonic Logging (CSL).....	222
8.9	Tecnica di rilevamento ReMi	224
8.10	Tecnica di rilevamento SPAC	226
8.11	Tecnica del rapporto spettrale H/V	227
8.11.1	Metodo di calcolo della frequenza fondamentale	228
8.11.2	Fenomeno della risonanza sismica	231
8.12	Bibliografia	231

CAPITOLO 9

TOMOGRAFIA SISMICA DI SUPERFICIE.....	237	
9.1	Introduzione.....	237
9.2	Acquisizione dei dati.....	238
9.3	Parametrizzazione ed elaborazioni del modello di calcolo.....	239
9.4	Tempi di percorso	243
9.4.1	Metodo del gradiente coniugato	244
9.4.2	Metodi di ricostruzione algebrica	246
9.4.3	Metodo della marcia veloce	247
9.4.4	Metodo della marcia veloce multi-forma	249
9.5	Bibliografia	252

CAPITOLO 10

PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE.....	255	
10.1	Generalità	255
10.2	Impedenza acustica e coefficiente di riflessione.....	256

INDICE

10.3	Geometria dei percorsi dei raggi riflessi	257
10.3.1	Riflettori orizzontali multipli.....	259
10.3.2	Riflettori inclinati	260
10.3.3	Percorsi delle riflessioni multiple	261
10.4	Rappresentazione dei segnali.....	262
10.5	Risoluzione verticale e orizzontale	263
10.6	Sistemi per l'acquisizione e la misura dei segnali sismici riflessi.....	264
10.7	Correzioni da applicare alle tracce sismiche	268
10.8	Filtraggio dei dati sismici.....	269
10.9	Migrazione dei dati di riflessione	270
10.10	Interpretazione dei profili sismici.....	273
10.11	Bibliografia	274

CAPITOLO 11

SOFTWARE SISMIC	277	
11.1	Descrizione.....	277
11.2	Come scaricare e installare il programma	277
11.3	Attivazione del programma.....	278
11.4	Requisiti per il funzionamento.....	279
11.5	Interfaccia principale del programma	280
11.6	Barra dei comandi	280
11.7	Menu laterali	281
11.8	Scheda parametri sismici	283
11.9	Scheda correlazioni geotecniche.....	288
11.10	Scheda profilo verticale delle velocità VS.....	293
11.11	Anteprima di stampa	294
11.12	Report.....	295
11.13	Bibliografia	295

PREFAZIONE

Lo studio del sottosuolo ha da sempre attirato l'attenzione di numerosi ricercatori sulle possibilità di raggiungere dei livelli di conoscenza adeguati sulla reale condizione di ciò che si nasconde in profondità sotto la superficie terrestre. Ed è proprio con i metodi di indagine indiretti, tipici della geofisica, che si riesce a investigare un volume di terreno ampio mantenendo i costi entro certi limiti di spesa. Si tratta di informazioni utili e spesso indispensabili che, combinate con i vari metodi di indagine anche diretti, si arriva a ricostruire dapprima il modello geologico e successivamente a definire lo schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali, delle proprietà fisico-meccaniche dei vari litotipi, ecc. che ritroviamo concettualmente sintetizzato nel modello geotecnico. Gli argomenti nel libro sono stati ampliati partendo da dei brevi cenni teorici sulla formazione e struttura interna della Terra, in modo da avere un quadro generale completo per poter affrontare gli argomenti sui metodi geofisici di esplorazione del sottosuolo. È chiaro che non tutti i metodi descritti nel testo trovano sempre applicabilità nei contesti di uso comune. Specialmente nel campo dell'ingegneria civile. Ciò non toglie però che conoscere questi metodi e sapere come si usano può fornire al lettore un bagaglio culturale più ampio oltre al fatto che le tecniche di indagine magnetica, elettromagnetica, la sismica a riflessione e la gravimetria, in alcuni specifici contesti, oggi trovano una maggiore applicazione specialmente nel campo ambientale e della ricerca archeologica. A questi, ovviamente si affiancano i metodi tradizionali della geoelettrica, della sismica a rifrazione e della tomografia sismica.

Abbinato al libro c'è il software Sismic aggiornato alla versione 2.0 più completa, con una interfaccia moderna e più semplice. Un programma per ambiente ®Windows che calcola i principali parametri fisico-elastici dei terreni partendo dai valori delle velocità delle onde sismiche in funzione delle profondità dei rifrattori. Inoltre, determina la categoria di sottosuolo dai valori di V_s equivalenti per i diversi livelli di riferimento assegnati. In ultimo, stima con dei modelli matematici alcuni parametri geotecnici quali il numero di colpi N_{spt} di una prova penetrometrica, l'angolo di attrito, la definizione del grado di addensamento e di consistenza.

Faustino Cetraro

PRIMA PARTE

Formazione, geodinamica e struttura interna della Terra

CAPITOLO 1

BREVI ACCENNI SUL SISTEMA TERRA

1.1 Origine e formazione della Terra

Tutto parte dalla teoria del *Big Bang*, una grande esplosione avvenuta circa 15 miliardi di anni fa che ha disperso nello spazio una notevole quantità di materia incandescente; poi unitasi per formare le stelle, i pianeti, ecc. sino a raggiungere quello che oggi definiamo universo.

Come ben si sa, la Terra ha un'età di circa 4.5 miliardi di anni corrispondenti pressappoco ad un terzo dell'età dell'universo. Agli stadi primordiali la Terra era una palla di materia infuocata e che lentamente inizia a raffreddarsi dando origine alla formazione della crosta terrestre.

Comincia il ciclo dei supercontinenti dovuto alle collisioni di porzioni e frammenti di crosta continentale "galleggianti". Il primo fra tutti è *Vaalbara* (3.6 e 2.8 miliardi di anni fa), nome coniato dalle ultime quattro lettere dei due cratoni che probabilmente lo costituivano: il *Kaapvaal* (il cui centro è nell'attuale Provincia del *Limpopo* nel Sudafrica) e il *Pilbara* (antichissima e stabile porzione della litosfera continentale, oggi riconducibile alla regione di *Pilbara* in Australia Occidentale).

In seguito dopo circa 300 Ma i continenti si separarono e rimasero in questo modo per almeno altri 400 Ma quando si unirono nuovamente nel supercontinente *Rodinia* (circa 1.1 miliardi a 750 milioni di anni fa).

Anche quest'ultimo si suddivise per poi unirsi dopo circa 100 Ma dando origine a *Pannotia* esistito fra i 600 ed i 540 milioni di anni fa durante il Precambriano. Da questo si ottennero quattro supercontinenti: *Laurentia*, *Baltica*, *Siberia* e *Gondwana*, che a loro volta si ricombinarono dando vita a *Pangea* (circa 300 Ma). *Ur* sopravvisse fino a circa 208 Ma dove si spezzò nei due continenti: *Laurasia* e *Gondwana* per la suddivisione di *Pangea*. Oggi i residui di *Ur* si trovano in Africa, Australia, Madagascar e in India.

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO – PRIMA PARTE

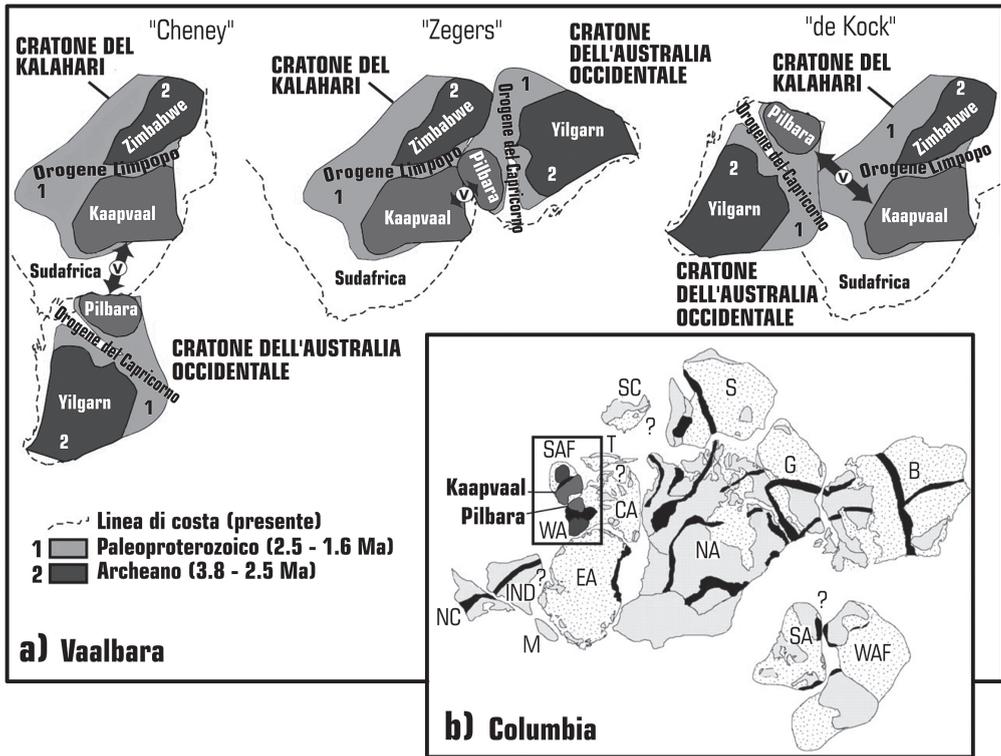


Figura 1.1 – Schemi dei supercontinenti; a) le tre proposte per il Vaalbara (Cheney, 1996; Zegers et al. 1998; e de Kock et al. 2009); b) Ricostruzione del Columbia (Zhao et al. 2002), dove B = Baltica, CA = Australia centrale, EA = Antartide orientale, G = Groenlandia, IND = India, M = Madagascar, NA = Nord America, NC = Cina settentrionale, S = Siberia, SA = Sud America, SAF = Sudafrica (Kalahari), SC = Cina meridionale, T = Tarim, WA = Australia occidentale, WAF = Africa occidentale. In questa il continente Vaalbara è intatto, molto simile al modello Cheney (1996).

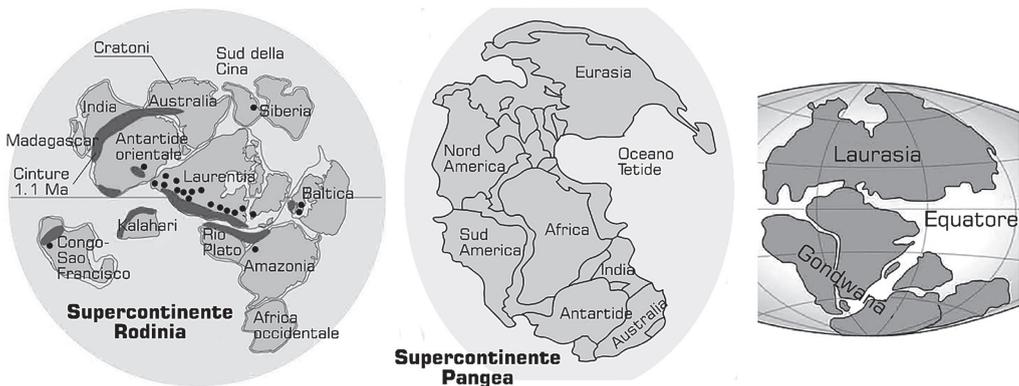


Figura 1.2 – Schemi dei supercontinenti da 1.1 Ma (Rodinia) a circa 180 Ma (Laurasia e Gondwana)

1.2 Concetto di geodinamica

A partire dalla fine del '600 e fino alla metà dell'800 furono ipotizzate diverse teorie “*fissiste*” sulla storia evolutiva del pianeta Terra. Tutto ebbe origine dal libro della Genesi a proposito del Diluvio universale. Tra il '700 e l'800 si affermò la credenza che le rocce si fossero formate dagli oceani per precipitazione e stratificazione dei sali, e che a seguito del ritiro delle acque si sarebbero scoperte formando così i continenti e le catene orogenetiche. Un concetto poco realistico visto che tutte le rocce, compresi i graniti e il basalto, si sarebbero formate unicamente in questo modo. Questa teoria prese il nome di *nettunismo* da Abraham Gottlob Werner (1749-1817) e fu poco convincente in quanto nessuno riuscì a dare una spiegazione su che fine avessero fatto le acque che si sarebbero ritirate.

In contrapposizione a questa teoria nasceva il *plutonismo* dove l'ipotesi era fondata sul fatto che le rocce si fossero formate da una massa incandescente prodotta dal calore interno della Terra fin dalle sue origini. Ma ciò non bastava a spiegare tutti i fenomeni di modellamento della superficie terrestre; così nacque la teoria dell'*attualismo* basata sul concetto che la Terra fosse stata modellata da processi lenti e gradualmente prodotti dalle azioni dei venti, dal clima e dalle acque. Tale modello riconosceva l'origine eruttiva delle rocce intrusive ed effusive, così come dall'azione meccanica, chimica e organogena da cui si originano le rocce sedimentarie. Il maggiore esponente fu il geologo scozzese James Hutton, (1726-1797).

Negli anni a seguire, tra 1774 e il 1853, il geologo tedesco Christian Leopold von Buch formulò la teoria dei *crateri di sollevamento*. In questa teoria si pensava che le catene orogenetiche si sarebbero formate per la forte intrusione di masse magmatiche che crearono l'inarcamento della crosta terrestre. Più avanti agli inizi dell'800, il naturalista francese Georges Léopold Cuvier riprese il concetto di Diluvio universale, come una delle ultime cause delle grandi catastrofi responsabili dei ricambi biologici nella lunga storia della Terra da cui prese il nome di *catastrofismo*. Queste ipotesi furono riprese e riformulate svariate volte negli anni da diversi autori fra i quali Charles Lyell (1797-1875) che partendo dal pensiero di Hutton affermò che “*il presente è la chiave del passato*”. Ciò portò al concetto teorico dell'*uniformismo* secondo cui l'intensità delle cause è costante nel tempo. Questo non è vero ovviamente, in quanto le cause per gli effetti, come ben si sa, variano nel tempo. Fu comunque un passaggio culturale importante. In effetti il passaggio dal catastrofismo all'uniformismo portò a formulare il concetto di *geodinamica*, riferito al pianeta come forma vivente e in continua evoluzione.

Tra il 1798 e il 1874 con la proposta del geologo francese Jean-Baptiste-Armand-Louis-Léonce Élie de Beaumont nacque la teoria della *contrazione della crosta*. In questo modello vengono identificate delle forze tangenziali che a causa del raffreddamento contraggono la superficie della Terra dando origine alla formazione delle catene mon-

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO – PRIMA PARTE

tuose. È una teoria che convince poco o per niente dato che per avere catene montuose elevate si sarebbe dovuto registrare un raffreddamento di migliaia di gradi, il che sembra essere poco plausibile.



Figura 1.3 – Illustrazione delle principali teorie concettuali sulla geodinamica evolutiva del sistema Terra

Un modello più recente è quello detto a *involucri concentrici* e con composizione differente proposto nel 1885 dal geologo austriaco Eduard Suess (1831-1914). L'ipotesi è l'esistenza di tre strati, detti *SIAL* (silicio e alluminio), *SIMA* (silicio e magnesio) e *NIFE* (nichel e ferro), così chiamati dalle iniziali degli elementi in prevalenza. A questi modelli si affiancarono le cosiddette teorie "verticaliste" dove l'ipotesi era la possibilità che delle zone della superficie terrestre potevano alzarsi o abbassarsi per il riassetto dell'equilibrio delle masse dando origine alle catene montuose ai bacini e alle depressioni con la formazione degli oceani. In concomitanza vennero fuori le teorie sulle *geosinclinali*⁽¹⁾ nelle quali fu riconosciuto che il peso delle masse provoca la subsidenza del fondo con un conseguente accumulo di materiale. Il materiale in questo modo genera una spinta orizzontale che solleva le zone adiacenti. Il risultato finale è la formazione

1. James Dwight Dana, 1813-1895.

delle catene montuose. L'altra teoria definita dal geologo americano Clarence Edward Dutton (1841-1912) è quella *isostatica* che ammette il movimento dei blocchi della crosta terrestre. L'evoluzione sulla conoscenza non si è mai fermata. È tutt'ora in continua evoluzione man mano che si acquisiscono nuove informazioni.

1.3 Struttura interna

Le teorie del passato che ben conosciamo descrivono la struttura interna della Terra come degli strati di materia non omogenea a diverso spessore. Le conoscenze hanno origine da informazioni storiche e sulle osservazioni indirette dei metodi geofisici. Tutto ciò che oggi sappiamo lo dobbiamo allo studio delle onde sismiche dei grandi terremoti che si propagano all'interno della Terra e che vengono registrate dai sismografi. Attraverso lo studio dei tempi di arrivo e le considerazioni necessarie sui materiali litologici, sulle proprietà fisico-elastiche delle masse attraversate dalle onde sismiche, ecc. si è in grado di ottenere una ricostruzione indiretta della struttura interna della Terra.

Oggi sappiamo che l'interno della Terra ha tre superfici di separazione principali. La prima si trova ad una profondità media di circa 30 km (variabile tra i 20 km e gli 80 km sotto i continenti e tra 4 km e 10 km sotto i bacini oceanici). In alcune aree sensibilmente instabili lo spessore si assottiglia (circa 1 km), mentre sotto la catena dell'Himalaya si inspessisce (fino a 90 km). È la discontinuità di Mohorovičić, spesso abbreviata in Moho, che separa la crosta terrestre dal mantello.

La crosta è la parte più esterna della terra solida ed è distinta in *continentale* e *oceanica*. La prima si estende sotto i continenti con una densità media di 2.7 g/cm^3 . È composta da rocce acide ricoperte da sedimenti nella parte più esterna, dove al di sotto di essa ci sono le rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche che indicano le antiche tracce del passato. La parte più interna della crosta si suppone che abbia una densità di circa 3 g/cm^3 , simile a quella della crosta oceanica a composizione più basica e alquanto più giovane (circa 200 Ma) rispetto alla precedente. Lo strato più superficiale della crosta oceanica è costituito da sedimenti oceanici (spessore da 0 km a 3 km), quello centrale da basalto con una struttura a cuscini (circa 1.5 km) e quello più profondo da gabbro (circa 5 km).

Sotto la crosta vi è il mantello che si estende dai 30 km fino alla profondità di 2900 km dove incontra una seconda superficie di separazione, quella di Gutenberg. Da questo punto in poi le onde di taglio ricadono nella cosiddetta zona d'ombra tra i 103° e i 143° . Ciò significa che lo strato attraversato è una massa fusa, dal semplice fatto che non sono state registrate le velocità delle onde di taglio (come si sa il taglio non si manifesta nei liquidi). Le rocce sono per lo più ultrabasiche con olivine, pirosseni (silicati di ferro e magnesio) e peridotiti. La densità varia da 3.3 g/cm^3 a 5.6 g/cm^3 . Come la crosta, anche il mantello è distinto in *superiore* fino a circa 700 km ed *inferiore* fino alla discontinuità di Gutenberg.

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO – PRIMA PARTE

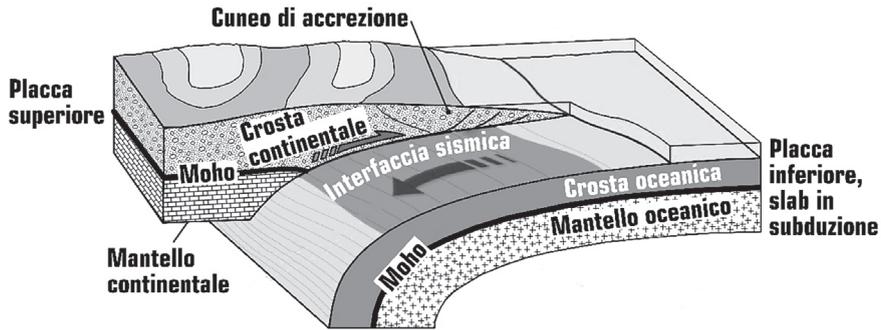


Figura 1.4 – Discontinuità principale tra crosta e mantello

La temperatura, così come la pressione, sale rapidamente con la profondità raggiungendo rispettivamente i 3000 °C e circa 1400 kbar. L'ultima superficie è quella di Lehmann che suddivide il nucleo esterno da quello interno a circa 5100 km. Si presume che le rocce siano costituite da metalli pesanti come il ferro legato ad elementi più leggeri come l'ossigeno, il silicio e lo zolfo.

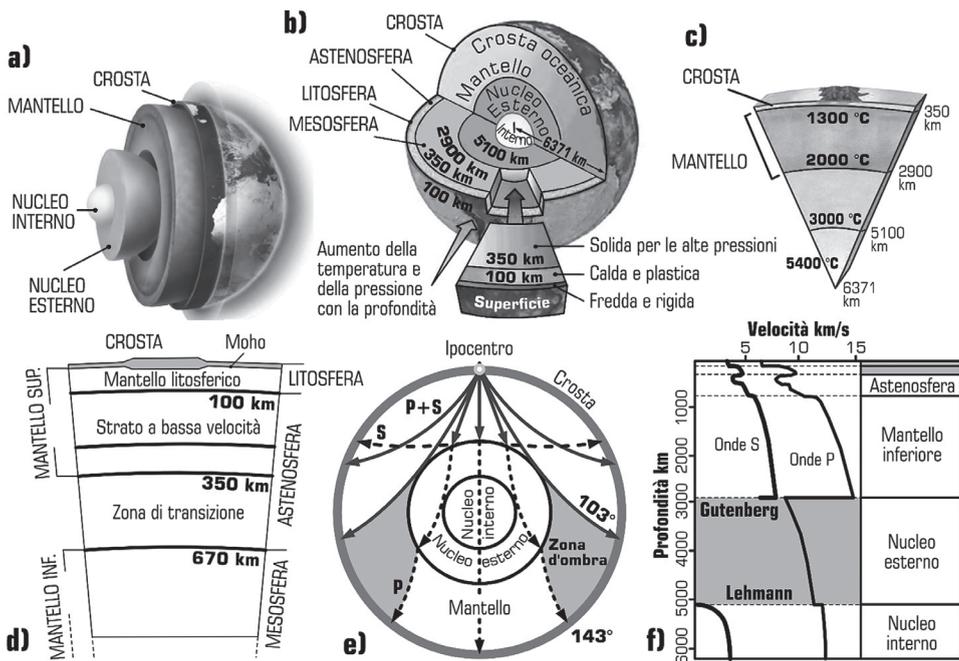


Figura 1.5 – a) schema generale; b) Dettagli sulle profondità; c) Andamento delle temperature con la profondità; d) Suddivisione del mantello; e) Zona d'ombra rilevata dalle onde sismiche; f) Andamento delle velocità delle onde sismiche con la profondità

Pagine omesse dall'anteprima del volume

CAPITOLO 8

PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

8.1 Premessa

La prospezione sismica è un metodo indiretto di investigazione del sottosuolo. Infatti, attraverso lo studio delle onde sismiche che si propagano nei terreni si riesce ad ottenere una ricostruzione dei vari sismostrati a diversa rigidità. Questo dipende chiaramente dalle caratteristiche elastiche e meccaniche dei materiali che le onde sismiche attraversano durante il loro tragitto. In ogni caso i principi basilari della sismica a rifrazione sono gli stessi che regolano lo studio dei terremoti con la differenza che nel primo caso la perturbazione viene misurata in un istante e da un punto ben preciso, nel secondo caso invece la sorgente è quella naturale, pertanto non si sa né il momento e né l'origine con cui l'evento si manifesta. La scienza che studia questi fenomeni naturali è detta sismologia ed usa il sismografo come strumento di misura permanente (introdotto per la prima volta nel 1751 dal Padre Benedettino A. Bina). Gli obiettivi principali sono due. Il primo è contribuire alla conoscenza dell'interno della Terra, come abbiamo già descritto nel capitolo introduttivo. Il secondo per studiare i terremoti come mezzo di prevenzione. Per quest'ultimo obiettivo ci occuperemo in questo capitolo trattando i metodi di prospezione sismica applicata al campo dell'ingegneria civile. Prima di procedere però è necessario dare delle informazioni di carattere generale sul tipo di onde sismiche e sui metodi di acquisizione.

8.2 Tipologie di onde sismiche e strumenti di misura

Le onde elastiche che si propagano durante un terremoto sono di diverso tipo e in alcuni casi possono risultare con un movimento prevalentemente orizzontale o verticale del terreno (scossa ondulatoria o sussultoria). Un terremoto può essere accompagnato da forti rumori sotterranei che possono ricordare boati, rombi, tuoni, sequenze di spari, ecc. Questi suoni sono dovuti al passaggio delle onde sismiche da un materiale all'altro a diversa densità. I più forti sono di norma accompagnati da altri più piccoli noti come *scosse di assestamento* (seguono la scossa principale). La fonte del terremoto è distribuita su

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO – PARTE TERZA

un'area significativa ed è variabile in base alle dimensioni del sisma, ovvero all'energia sprigionata. Nel caso dei grossi terremoti può raggiungere distanze di oltre un migliaio di chilometri. Il punto di origine è detto "fuoco". Di solito rappresenta il luogo in cui si produce la frattura e si libera energia sotto forma di onde elastiche. La posizione del "fuoco" si chiama *ipocentro* e la sua proiezione sulla superficie terrestre è l'*epicentro*. Le onde che si propagano all'interno della Terra sono dette *onde di volume*. Le principali sono le onde *P* (primarie), le più veloci e viaggiano in senso longitudinale alla loro direzione. Al loro passaggio le rocce si comprimono e si dilatano continuamente. Dopo queste arrivano le onde *S* (secondarie) che viaggiano più lentamente e fanno sì che le particelle coinvolte oscillano in senso trasversale alla loro direzione di propagazione. A differenza delle onde *P* le onde *S* non provocano cambiamenti di volume al loro passaggio, pertanto non si propagano nei liquidi. Quando queste onde *P* e *S* raggiungono un qualsiasi punto sulla superficie terrestre danno origine a delle onde concentriche più lente.

Le principali sono quelle di Rayleigh e ricordano le onde che si generano quando viene lanciato un sasso in uno stagno. Vibrano con orbite ellittiche e retrograde rispetto alla direzione di propagazione. Poi le onde di Love che creano un movimento trasversale ed orizzontale rispetto alla direzione di propagazione. Queste onde di superficie sono le più pericolose in quanto creano i maggiori danni alle strutture.

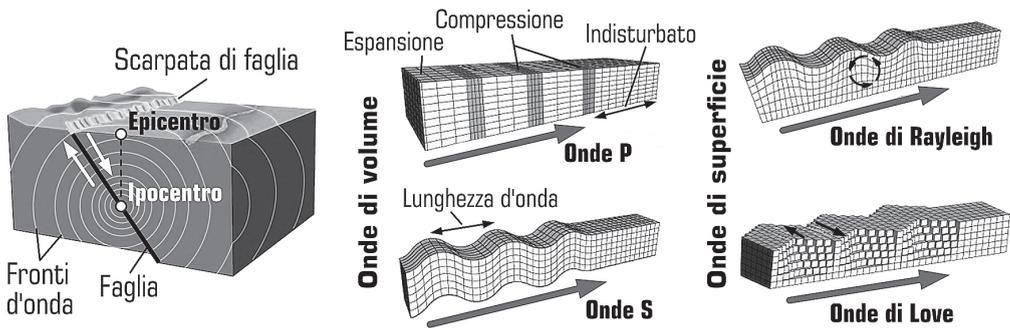


Figura 8.1 – A sinistra lo schema del meccanismo per un terremoto, a destra le oscillazioni delle particelle al passaggio delle onde sismiche

Le misure vengono registrate con il sismografo che rende visibili e misurabili gli spostamenti del terreno grazie ad un sistema di amplificazione che riproduce le vibrazioni. Sono composti da due o più parti.

Il sismometro (strumento di rilevazione) e il registratore (trascrive le informazioni). Spesso i due componenti sono dislocati in luoghi diversi. Lo strumento di rilevazione si trova in una stazione sismica, mentre l'apparato che trascrive e produce il sismogramma si trova presso un laboratorio.

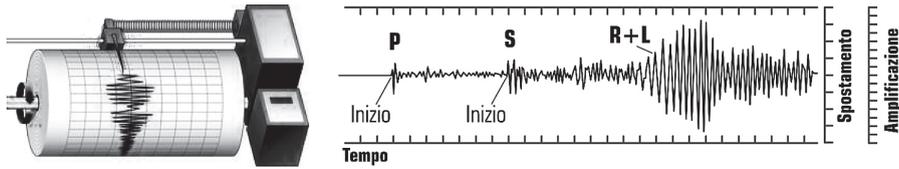


Figura 8.2 – A sinistra l'apparato che trascrive le informazioni rilevate dal sismometro, a destra il sismogramma con le principali onde sismiche

Per la caratterizzazione del sottosuolo dal punto di vista ingegneristico si usano strumenti che hanno alla base gli stessi principi della sismologia, ma che differiscono per i vari aspetti quali le modalità di acquisizione, le attrezzature e i modelli di calcolo usati per elaborare i dati delle misure. In genere la sismica a rifrazione è caratterizzata da un sismografo multicanale (8, 12, 16, 24 o 48), dai canali detti geofoni (orizzontali o verticali), dal geofono start, da un sistema di energizzazione per generare l'impulso sismico, da una serie di cavi sismici di collegamento, una batteria (opzionale), una bindella metrica e in alcuni casi dal *landstreamer* (un sistema a cui agganciare la serie dei geofoni per poterli spostare con facilità sul terreno). La stessa attrezzatura viene usata anche per la sismica a riflessione con la differenza che le stese sismiche sono molto più lunghe e la frequenza di campionamento dei sensori è differente. Per i segnali di superficie si usano dei sensori in 3D caratterizzati da 3 sensori disposti due nel piano XY e uno lungo l'asse Z. In tal caso si possono avere sistemi attivi o passivi in base alla tipologia di acquisizione che si desidera utilizzare. A questi poi si aggiungono i sistemi per la sismica in foro (Down-Hole, Cross-Hole, ecc.) dove i geofoni sono specifici da pozzo.

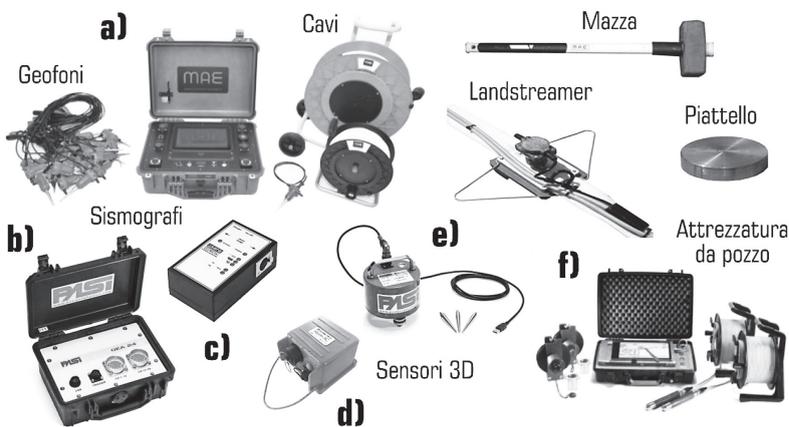


Figura 8.3 – Esempi di attrezzatura per la sismica in ambito ingegneristico. a) Kit sismografo X820S 24 canali – MAE; b) Sismografo GEA24 P.A.S.I.; c) Sismografo DoReMi – SARA electronic instruments s.r.l.; d) Sismografo Atom-3C – Geometrics; e) GEMINI-2 – PASI; f) Attrezzatura da pozzo (cross-hole)

8.3 Legge di Snell e principio di Huygens

La legge di Snell in ottica definisce una relazione tra il percorso che un raggio di luce compie tra due mezzi a indice di rifrazione diverso. Fu scoperta nel 1621 dall'astronomo e matematico olandese Willebrord Snell (chiamato Snellius) e pubblicata dall'olandese Christiaan Huygens nel suo trattato del 1690. È nota come legge di rifrazione e può essere applicata ad ogni materiale. La maggior parte delle persone ha inconsapevolmente familiarità con questa legge quando ad esempio osserva una matita immersa in un bicchiere d'acqua e gli appare come se fosse spezzata e distorta. Questa legge afferma che *“il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e quello rifratto corrisponde dell'indice di rifrazione dei materiali di ogni interfaccia”*. Una regola di carattere qualitativa per determinare la direzione della rifrazione è che il raggio luminoso è sempre più vicino alla normale dal lato del mezzo più denso.

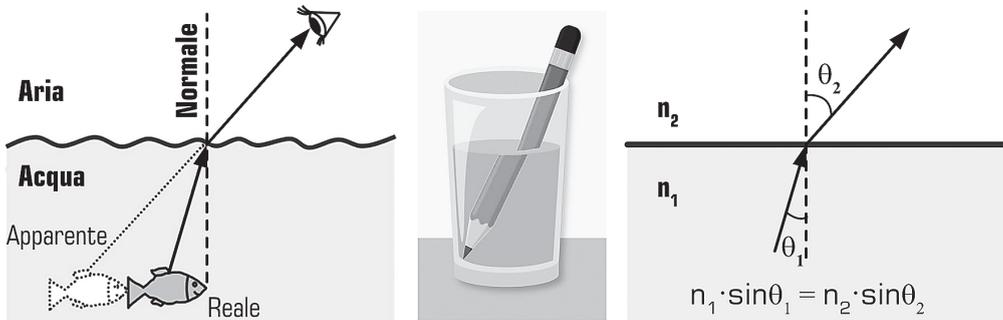


Figura 8.4 – Legge di Snell. Alcuni esempi di uso comune. La posizione del pesce in acqua è apparente rispetto a quella che la vista osserva; la matita immersa in un bicchiere d'acqua appare spezzata e distorta

La stessa legge si applica ai raggi sismici che si propagano nel sottosuolo. È una legge che possiamo sintetizzare così:

- Il raggio incidente, il raggio riflesso e il raggio rifratto giacciono su uno stesso piano normale alla superficie di separazione.
- L'angolo formato dal raggio incidente con la normale alla superficie di separazione è uguale all'angolo di riflessione.
- Il rapporto tra i seni degli angoli incidente e rifratto è proporzionale al rapporto tra le velocità di propagazione del primo e del secondo mezzo.

Altro fattore importante è il principio di Fermat che afferma: *il percorso seguito da un raggio di luce per andare da un punto ad un altro attraverso un qualsiasi insieme di mezzi è quello che richiede il minor cammino ottico.*

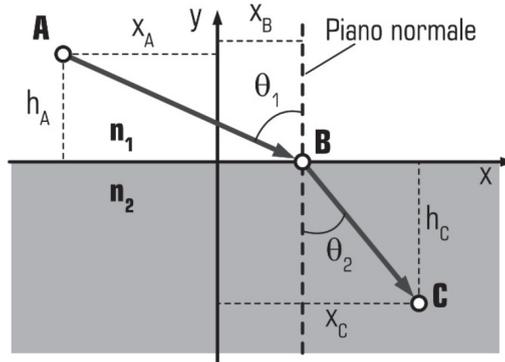


Figura 8.5 – Schema generale per la definizione del cammino ottico AC

$$AC = \frac{AB}{n_1} + \frac{BC}{n_2} = \frac{\sqrt{(x_A + x_B)^2 + h_A^2}}{n_1} + \frac{\sqrt{(x_C - x_B)^2 + h_B^2}}{n_2}$$

$$\frac{dAC(x)}{dx} = \frac{1}{n_1} \cdot \frac{(x_A + x_B)}{\sqrt{(x_A + x_B)^2 + h_A^2}} - \frac{1}{n_2} \cdot \frac{(x_C - x_B)}{\sqrt{(x_C - x_B)^2 + h_B^2}} = \frac{\sin\theta_1}{n_1} - \frac{\sin\theta_2}{n_2}$$

Il principio di Huygens ci dice che: “ciascun punto di un fronte d’onda si comporta come una sorgente puntiforme secondaria di fronti d’onda sferici. La forma in cui evolve il fronte d’onda è data dall’involuppo di tutti i fronti d’onda sferici delle sorgenti secondarie”. Il caso più comune è quello della propagazione di un’onda piana (generalmente luce, onde radio) attraverso un qualsiasi foro. In questo caso il principio ci dice che l’estensione del foro può essere considerata come un insieme di tanti forellini più piccoli in modo che ciascuno di essi si comporti come una sorgente puntiforme.

Una sorgente puntiforme genera un’onda sferica che si propaga in tutte le direzioni dello spazio (in maniera simile alle onde causate dal lancio di un sasso in uno stagno). I punti fondamentali di questo principio sono così riassunti:

- se l’onda si propaga in un mezzo unidimensionale anche le nuove onde sono unidimensionali;
- se l’onda si propaga in un mezzo bidimensionale (un piano), le nuove onde sono circolari;
- se l’onda si propaga in un mezzo tridimensionale, le nuove onde sono sferiche.

Inoltre, quando avviene una propagazione di un’onda in un mezzo omogeneo le sovrapposizioni che si manifestano fra le varie sorgenti adiacenti vengono dette involuppi. Queste creano delle interferenze distruttive per tutti i fronti d’onda generati,

INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO – PARTE TERZA

mentre mantengono una forma costruttiva per i fronti d'onda di origine. Così gli involuppi delle onde secondarie riescono a riprodurre il fronte originario in accordo con la propagazione dell'onda nel mezzo.

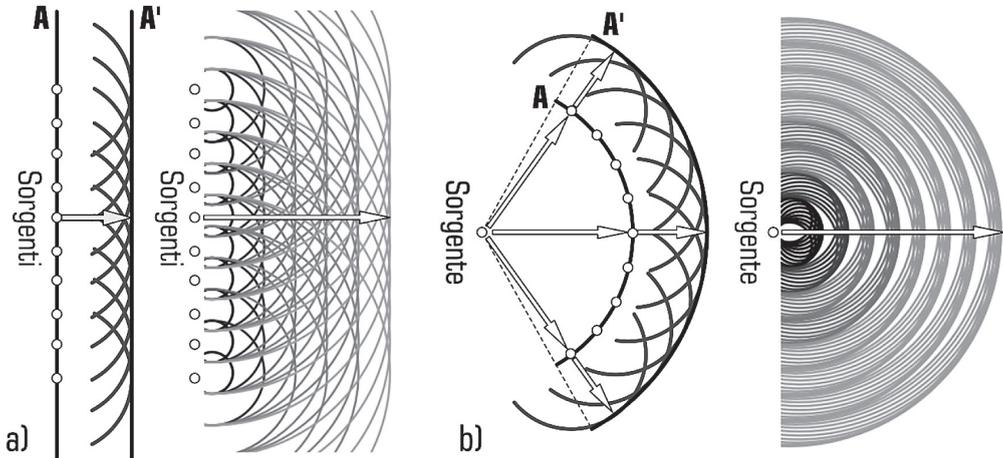


Figura 8.6 – Schemi del principio di Huygens. a) Fronte d'onda piana; b) Fronte d'onda sferica

I fronti d'onda man mano che si allontanano dalla sorgente si allargano e l'energia diminuisce con il quadrato della distanza. Questo fenomeno è conosciuto come **legge di attenuazione** dipendente da molti fattori come la divergenza geometrica, il coefficiente di riflessione, l'assorbimento di energia da parte del materiale, la perdita per trasmissione da un mezzo ad un altro, l'effetto delle riflessioni multiple (*peg-leg*), ecc.

Quando un fronte d'onda sferico si propaga in un mezzo omogeneo, continuo ed isotropo da una sorgente verso l'esterno, la sua intensità tende a diminuire proporzionalmente all'inverso del suo raggio. Così come l'assorbimento dei materiali ne attenua le ampiezze delle onde convertendo l'energia di moto in energia termica per i seguenti fenomeni: l'anelasticità dei materiali, la termoelettricità, la piezoelettricità, l'isteresi, l'assorbimento viscoso in presenza di liquidi, ecc. La perdita si registra con il decadimento dell'ampiezza del segnale dove le alte frequenze sono attenuate. Altri fattori che possono influenzare la perdita di energia sono:

- lo *scattering*, ovvero la riflessione non speculare, in cui un raggio incidente sulla superficie non viene rimandato indietro secondo la legge di riflessione speculare, ma viene diffuso su molte direzioni che possiamo descrivere come casuali;
- la *conversione d'onda*, quando la perturbazione elastica è incidente su una superficie di separazione tra due mezzi a diverse proprietà elastiche.

Pagine omesse dall'anteprima del volume

CAPITOLO 11

SOFTWARE SISMIC

11.1 Descrizione

Con la versione 2.0 del software sono stati apportati notevoli cambiamenti rispetto alla precedente versione. Prima di tutto l'interfaccia principale è stata modificata, resa più semplice nell'utilizzo, e dalla quale si può controllare in ogni momento l'intero processo di elaborazione dei dati. Il lavoro svolto con questa nuova versione viene salvato in un unico file con estensione *sim* o *xml*, non compatibile con le vecchie versioni dove i file erano distinti per moduli applicativi.

Il programma calcola i parametri fisico-elastici dei terreni partendo dai valori delle velocità delle onde sismiche in funzione delle relative profondità dei rifrattori. I valori dei parametri calcolati sono: il modulo di Poisson, di taglio, di Young, di incompressibilità e il modulo edometrico. Vengono stimati i parametri dinamici del peso di volume del terreno (naturale e saturo), la densità, il valore del numero di colpi di una prova N_{spt} dal quale si ottengono le correlazioni con l'angolo di attrito, la densità relativa e la definizione del grado di addensamento e di consistenza dei terreni. Il programma, inoltre, determina il valore del V_s equivalente secondo l'approccio semplificato delle NTC 2018 e s.m.i. Tale valore può essere riferito a più piani di imposta per le fondazioni. Fra le opzioni presenti c'è la possibilità di scegliere il sistema per le unità di misura, variare il colore per i simboli e le linee disegnate sui grafici, inserire un retino per rappresentare la litologia da visualizzare sulla colonna sismostratigrafica. Il programma è sviluppato per l'ambiente ®Windows, dalla versione 7 alla 11 e per sistemi a 32 e 64 bit.

11.2 Come scaricare e installare il programma

Per scaricare il programma *Sismic 2.0* occorre accedere alla sezione **My EPC** del sito www.epc.it utilizzando le credenziali per l'acquisto o effettuando una nuova registrazione.

Nella sezione **My EPC**:

- entrare nella sezione **Contenuti digitali cliccando** su **I tuoi contenuti digitali**;
- inserire il **codice etichetta** che si trova a *pagina 1* di questo volume e premere **Attiva**
- ne **La mia libreria**, in corrispondenza del prodotto *INDAGINI GEOFISICHE DEL SUOLO*, cliccare su **Vedi contenuti** per scaricare il setup del programma.

Per **installare il programma Sismic 2.0** eseguire il file **Setup_Sismic_v_2.exe**. Alla sua esecuzione compare la finestra di dialogo, si preme il pulsante **Avanti**, si accettano i termini dell'accordo di licenza e infine, con il tasto **Installa**, il programma verrà installato. È necessario che il setup venga eseguito in modalità amministratore (cliccando il tasto destro del mouse e scegliendo "Esegui come amministratore"). L'avvio del programma può avvenire dal collegamento creato sul desktop o dal menu dei programmi nella relativa sezione. In quest'ultimo caso troviamo anche i collegamenti per la guida e per la disinstallazione.

11.3 Attivazione del programma

Una volta completata l'installazione si procede alla registrazione del software **Sismic 2.0**: esso è dotato di un sistema di protezione il cui sblocco avviene solo dopo l'inserimento di un codice identificativo fornito direttamente dalla EPC Editore che ne permette l'installazione e l'utilizzo su una sola macchina.

Al momento della prima esecuzione il programma visualizza una finestra contenente i numeri identificativi del computer (**Site code** e **Hardware ID**). L'utente inserisce nell'apposito spazio il **codice etichetta** che si trova a *pagina 1* di questo volume (lo stesso che è servito per scaricare il setup).

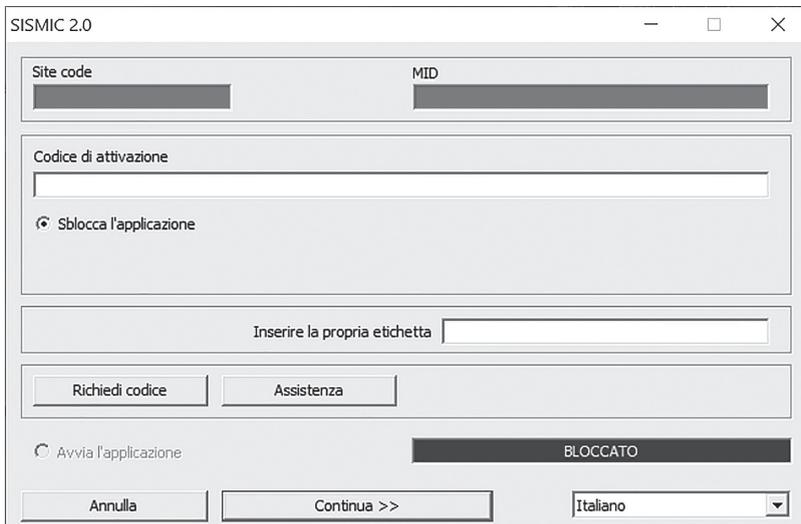


Figura 11.1 – Schermata di attivazione di Sismic 2.0

Lasciando aperta la finestra di dialogo di **Sismic 2.0**, l'utente si collega alla pagina internet www.epc.it e, attraverso le sue credenziali, accede alla sezione **My EPC**.

Nella sezione **My EPC**, occorre scorrere la pagina fino ad arrivare al paragrafo **Attivazione e Aggiornamenti Software** e qui premere il tasto **Attivazione software**.

Home :: My EPC :: Attivazione dei prodotti

Attivazione software EPC

Per attivare un software EPC seguire le istruzioni riportate a video:

Etichetta del prodotto:

AVANTI

Figura 11.2 – Schermata di epc.it per la richiesta del codice di attivazione

A questo punto occorre inserire l'etichetta del prodotto e, cliccando il tasto **Avanti**, procedere con l'inserimento del **Site code** e dell'**Hardware ID** che si trovano nella finestra di dialogo del software **Sismic 2.0**.

Premendo il tasto **Fine**, il programma di attivazione rilascia il codice di attivazione che viene visualizzato e contemporaneamente inviato all'indirizzo e-mail dell'utente.

Il codice di attivazione così ottenuto va riportato sulla finestra di attivazione del programma; una volta inserito non verrà più richiesto.

Ora il software **Sismic 2.0** è pronto per l'utilizzo.

11.4 Requisiti per il funzionamento

Il programma per funzionare richiede che sulla propria postazione sia installato il .Net Framework 4.7.2. e che si abbiano i diritti o i privilegi di amministratore.

Per visualizzare il report in formato *docx* occorre che sulla propria postazione sia installato un editor di testo compatibile con tale formato.

11.5 Interfaccia principale del programma

L'interfaccia principale del programma è stata completamente riscritta per migliorarla e renderla più fruibile, anche in modo più semplice, da parte dell'utente finale. L'avvio del programma può avvenire dal collegamento creato sul desktop o dal menu dei programmi nella relativa sezione. In quest'ultimo caso troviamo anche i collegamenti per la guida e per la disinstallazione. La struttura dell'interfaccia è molto semplice. Nella parte in alto troviamo la barra dei comandi principali con affianco il logo e le informazioni di sviluppo. Sul lato sinistro sono presenti due gruppi di menu. Il primo contiene i comandi per spostarsi tra le tre schede di calcolo, il secondo mostra i settaggi quali il sistema di misura e i colori da assegnare agli oggetti disegnati sui vari grafici. A seguire troviamo le note informative sulla casa editrice. Infine in basso troviamo la selezione per le schede di calcolo e la barra di stato contenente il percorso del file di lavoro con l'indicatore dei processi in esecuzione.

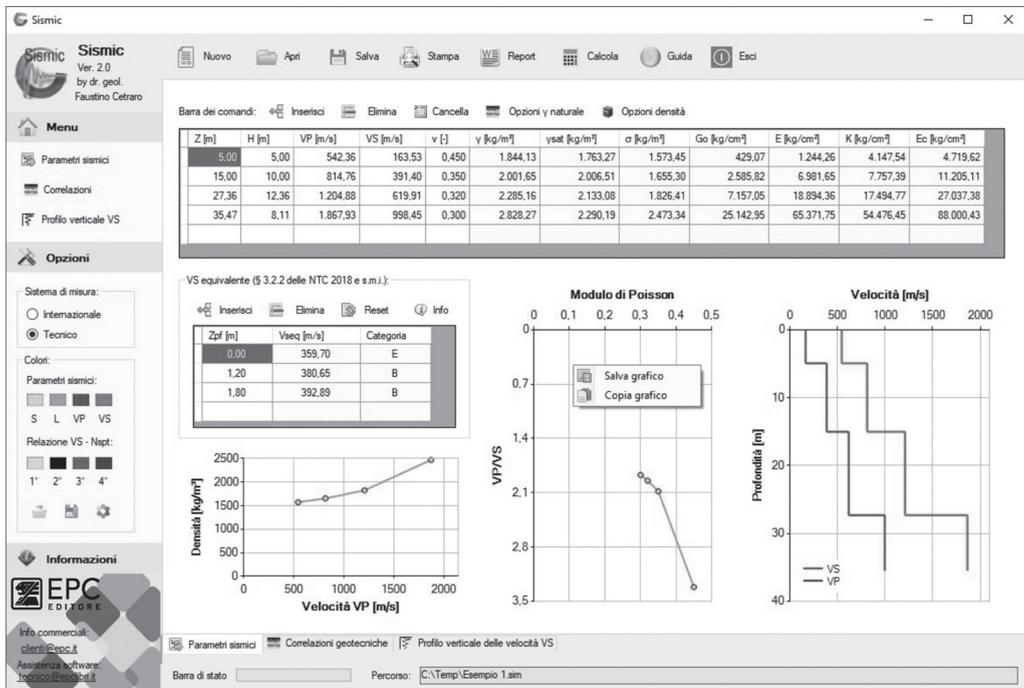


Figura 11.3 – Interfaccia principale del programma completa di dati e risultati

11.6 Barra dei comandi

La barra dei comandi principali è posizionata in alto e racchiude i comandi:

– **Nuovo:** crea un nuovo documento di lavoro. Prima di procedere controlla se vi sono

dei dati già inseriti. In tale caso mostra un avviso con la richiesta di conferma dell'operazione.

- **Apri:** legge le informazioni contenute in un file precedentemente salvato con estensione *sim* o *xml* (*Extensible Markup Language*).
- **Salva:** avvia una interfaccia di dialogo dove è possibile scegliere il percorso di salvataggio del file. Dalla stessa interfaccia si può optare per il formato *sim* o *xml* dal menu posizionato in basso a destra.
- **Stampa:** mostra un'anteprima di stampa del profilo verticale delle velocità delle onde di taglio con la colonna sismostratigrafica. In questa fase è possibile scegliere il dispositivo di stampa e la scala di rappresentazione.
- **Report:** crea un file *docx* contenente le informazioni con i valori del calcolo. Il formato *docx* è un tipo di documento *Office Open XML* supportato dai più diffusi editor di testo.
- **Calcola:** esegue ed aggiorna i valori calcolati. Ad ogni modifica apportata ai valori o ai colori è necessario eseguire questo comando.
- **Guida:** avvia la guida di riferimento del programma.
- **Esci:** chiude il programma. Il comando controlla se vi sono dei dati nelle tabelle, in tal caso mostra un avviso con la richiesta di confermare l'operazione in esecuzione.



Figura 11.4 – Barra dei comandi principali

11.7 Menu laterali

Sulla parte laterale sinistra dell'interfaccia troviamo due gruppi contenenti dei comandi accessibili in ogni momento e da ogni scheda di calcolo. Il primo gruppo è denominato *Menu* e raggruppa:

- **Parametri sismici:** comando per visualizzare la scheda dove inserire i dati da elaborare.
- **Correlazioni:** visualizza la scheda con i valori di stima per le correlazioni geotecniche.
- **Profilo verticale VS:** mostra la scheda contenente il profilo verticale delle velocità delle onde di taglio con la relativa colonna sismostratigrafica.

Pagine omesse dall'anteprima del volume