

TERESA CREPELLANI JOHANN FACCIORUSSO

DINAMICA DEI TERRENI

PER LE APPLICAZIONI SISMICHE



Dario Flaccovio Editore

Teresa Crespellani – Johann Facciorusso
DINAMICA DEI TERRENI – PER LE APPLICAZIONI SISMICHE
ISBN 978-88-579-0042-1

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: ottobre 2010

Crespellani, Teresa <1934->

Dinamica dei terreni per le applicazioni sismiche / Teresa Crespellani, Johann Facciorusso. - Palermo : D. Flaccovio, 2010.
ISBN 978-88-579-0042-1

1. Geotecnica I. Facciorusso, Johann <1971->.
624.151 CDD-22 SBN Pa10229209

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, ottobre 2010.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0042

INDICE

| | |
|--|---------|
| <i>Premessa</i> | pag. IX |
| <i>Obiettivi e organizzazione del volume</i> | » XI |

Capitolo 1 – Caratteristiche dei problemi dinamici

| | |
|---|------|
| 1.1. La dinamica dei terreni e le sue applicazioni | » 1 |
| 1.2. Carichi dinamici e ciclici | » 3 |
| 1.2.1. Carichi dinamici | » 4 |
| 1.2.2. Carichi ciclici | » 5 |
| 1.3. Rapporto tra ampiezza dei carichi dinamici e ciclici e intensità dei carichi statici | » 6 |
| 1.4. Aspetti che caratterizzano la progettazione di opere geotecniche in campo dinamico | » 7 |
| 1.4.1. Caratteristiche dell'eccitazione dinamica | » 8 |
| 1.4.2. Propagazione delle perturbazioni nel mezzo terreno e mutue interazioni tra onde sismiche e terreni .. | » 9 |
| 1.4.3. Effetti indotti nell'ambiente fisico e costruito | » 10 |
| 1.5. Differenze tra i problemi geotecnici in campo statico e dinamico | » 12 |
| 1.6. Continuità comportamentale dei terreni nel passaggio da condizioni di carico statico a condizioni di carico dinamico | » 13 |
| 1.7. Riassunto del capitolo | » 13 |
| 1.8. Riferimenti bibliografici | » 15 |

Capitolo 2 – Teoria delle vibrazioni e della propagazione delle onde sismiche

| | |
|--|------|
| 2.1. Natura delle vibrazioni | » 17 |
| 2.2. Tipi di vibrazioni | » 18 |
| 2.3. Vibrazioni armoniche | » 20 |
| 2.3.1. Rappresentazione trigonometrica del moto armonico | » 20 |
| 2.3.2. Rappresentazione vettoriale del moto armonico..... | » 22 |
| 2.3.3. Rappresentazione complessa del moto armonico | » 23 |
| 2.4. Vibrazioni irregolari | » 25 |
| 2.4.1. Teorema di Fourier | » 25 |
| 2.4.2. Trasformata di Fourier discreta..... | » 26 |
| 2.4.3. Rappresentazione delle vibrazioni nel dominio delle frequenze | » 27 |
| 2.5. Teoria dell'oscillatore semplice e spettro di risposta | » 29 |
| 2.5.1. Vibrazioni libere non smorzate | » 30 |
| 2.5.2. Vibrazioni libere smorzate | » 31 |
| 2.5.3. Vibrazioni forzate non smorzate | » 34 |
| 2.5.4. Vibrazioni forzate smorzate | » 36 |
| 2.5.5. Risposta dell'oscillatore semplice ad un carico periodico qualunque | » 39 |
| 2.5.6. Risposta dell'oscillatore semplice ad un carico sismico | » 40 |
| 2.5.7. Spettro di risposta | » 42 |
| 2.6. Le onde sismiche..... | » 43 |
| 2.6.1. Le onde di volume | » 43 |
| 2.6.2. Le onde di superficie | » 45 |
| 2.7. Teoria della propagazione delle onde sismiche in un mezzo elastico e isotropo | » 47 |
| 2.7.1. Mezzo omogeneo infinitamente esteso..... | » 47 |
| 2.7.2. Mezzo omogeneo cilindrico | » 50 |
| 2.7.3. Mezzo omogeneo confinato e onde di superficie | » 55 |
| 2.7.4. Mezzo stratificato e confinato | » 56 |
| 2.8. Propagazione delle onde sismiche nei terreni reali..... | » 58 |

| | | |
|---------------------------------------|---|----|
| 2.9. Riassunto del capitolo | » | 60 |
| 2.10. Riferimenti bibliografici | » | 61 |

Capitolo 3 – Effetti della ciclicità e della velocità di applicazione dei carichi dinamici

| | | |
|---|---|----|
| 3.1. Stati di sforzo indotti dai terremoti e numero di cicli equivalente | » | 63 |
| 3.1.1. Sollecitazioni e deformazioni indotte dalle azioni sismiche | » | 64 |
| 3.1.2. Trasformazione di una sequenza ciclica irregolare in una sequenza regolare | » | 66 |
| 3.2. Effetti della ciclicità dei carichi a scala di microelemento | » | 68 |
| 3.2.1. Terreno ideale | » | 68 |
| 3.2.2. Terreni reali | » | 69 |
| 3.2.3. Fattori che governano le modificazioni dello scheletro solido in presenza di sforzi di taglio ciclici .. | » | 70 |
| 3.3. Effetti della velocità di applicazione e della ciclicità dei carichi a scala di macroelemento | » | 71 |
| 3.3.1. Risultati di prove monotoniche con l'apparecchio di taglio semplice ciclico | » | 72 |
| 3.3.2. Risultati di prove triassiali monotoniche | » | 75 |
| 3.4. Comportamento del terreno in presenza di carichi dinamici e ciclici | » | 79 |
| 3.5. Domini di comportamento in relazione ai livelli deformativi | » | 80 |
| 3.6. Soglie di deformazione lineare e volumetrica | » | 83 |
| 3.7. Riassunto del capitolo | » | 87 |
| 3.8. Riferimenti bibliografici | » | 88 |

Capitolo 4 – Comportamento del terreno a vari livelli deformativi

| | | |
|---|---|-----|
| 4.1. Problemi di dinamica dei terreni | » | 91 |
| 4.2. Comportamento del terreno a bassi livelli deformativi: modelli e parametri | » | 92 |
| 4.2.1. Modulo di taglio iniziale G_0 | » | 93 |
| 4.2.2. Fattori che influenzano il modulo di taglio iniziale G_0 e determinazione indiretta di G_0 | » | 94 |
| 4.2.3. Rapporto di smorzamento iniziale D_0 | » | 104 |
| 4.2.4. Fattori che influenzano il rapporto di smorzamento iniziale D_0 | » | 105 |
| 4.3. Comportamento del terreno a medi livelli di deformazione: modelli e parametri equivalenti | » | 108 |
| 4.3.1. Decadimento del modulo secante normalizzato $G(\gamma)/G_0$ con l'ampiezza della deformazione di taglio γ | » | 110 |
| 4.3.2. Variazione del rapporto di smorzamento D con l'ampiezza della deformazione di taglio γ | » | 112 |
| 4.4. Comportamento a elevati livelli deformativi e in prossimità della rottura: modelli e parametri | » | 115 |
| 4.4.1. Accoppiamento tra le fasi e tra le deformazioni volumetriche e distorsionali | » | 116 |
| 4.4.2. Degradazione delle proprietà meccaniche con il numero dei cicli | » | 119 |
| 4.5. Comportamento contraente e dilatante e stati caratteristici | » | 123 |
| 4.6. Riassunto del capitolo | » | 127 |
| 4.7. Riferimenti bibliografici | » | 128 |

Capitolo 5 – Comportamento a rottura dei terreni a grana grossa

| | | |
|--|---|-----|
| 5.1. Evidenze sperimentali e simulazione in laboratorio | » | 133 |
| 5.2. Comportamento di provini sabbiosi saturi a grandi deformazioni: liquefazione e mobilità ciclica | » | 134 |
| 5.2.1. Comportamento in presenza di carichi monotoniche | » | 136 |
| 5.2.2. Comportamento in presenza di carichi ciclici | » | 139 |
| 5.3. Il meccanismo della liquefazione | » | 142 |
| 5.3.1. Condizioni per l'innescio della liquefazione | » | 144 |
| 5.4. Resistenza dei terreni granulari ai carichi dinamici e ciclici | » | 144 |
| 5.4.1. Resistenza al taglio ciclica | » | 145 |
| 5.4.2. Fattori che influenzano la resistenza al taglio ciclica | » | 146 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.4.3. Resistenza al taglio non drenata post-ciclica | » | 148 |
| 5.5. Incremento delle pressioni interstiziali e modelli per i terreni a grana grossa | » | 152 |
| 5.6. Deformazioni permanenti post-cicliche | » | 154 |
| 5.7. Riassunto del capitolo | » | 156 |
| 5.8. Riferimenti bibliografici | » | 158 |

Capitolo 6 – Comportamento a rottura dei terreni a grana fine

| | | |
|--|---|-----|
| 6.1. Introduzione..... | » | 161 |
| 6.2. Aspetti caratteristici del comportamento dinamico e ciclico dei terreni a grana fine in prossimità della rottura | » | 162 |
| 6.2.1. Incremento della rigidità e della resistenza con la velocità di applicazione dei carichi e rapporto tra resistenza statica non drenata e resistenza dinamica..... | » | 162 |
| 6.2.2. Degradazione della rigidità e della resistenza del materiale con il numero dei cicli di carico.... | » | 165 |
| 6.2.3. Combinazione degli effetti di velocità di applicazione dei carichi e di degradazione ciclica e durata di applicazione dei carichi | » | 168 |
| 6.3. Incremento e accumulo delle pressioni interstiziali nei terreni argillosi | » | 168 |
| 6.4. Resistenza ciclica | » | 170 |
| 6.5. Resistenza post-ciclica | » | 173 |
| 6.5.1. Terreni argillosi normalconsolidati | » | 174 |
| 6.5.2. Terreni argillosi sovraconsolidati | » | 177 |
| 6.6. Deformazioni volumetriche..... | » | 180 |
| 6.7. Fattori che influenzano il comportamento dei terreni a grana fine in prossimità della rottura e problemi applicativi | » | 182 |
| 6.8. Riassunto del capitolo | » | 185 |
| 6.9. Riferimenti bibliografici | » | 186 |

Capitolo 7 – Modelli dinamici e ciclici

| | | |
|--|---|-----|
| 7.1. Risposte e modelli | » | 189 |
| 7.2. Modelli e parametri | » | 191 |
| 7.3. Modelli elastici | » | 193 |
| 7.4. Modelli lineari equivalenti | » | 194 |
| 7.4.1. Modello di Hardin e Drnevich | » | 197 |
| 7.4.2. Modelli iperbolici modificati | » | 197 |
| 7.4.3. Modello di Ramberg e Osgood..... | » | 199 |
| 7.5. Modelli non lineari | » | 201 |
| 7.6. Riassunto del capitolo | » | 203 |
| 7.7. Riferimenti bibliografici | » | 204 |

Capitolo 8 – Misura in sito dei parametri dinamici

| | | |
|--|---|-----|
| 8.1. Prove dinamiche in sito e in laboratorio | » | 205 |
| 8.2. Tecniche geofisiche e misure sismiche | » | 207 |
| 8.3. Misure sismiche in foro..... | » | 210 |
| 8.3.1. Ipotesi e modelli interpretativi: metodo diretto, dell'intervallo e dello pseudo-intervallo | » | 211 |
| 8.3.2. Strumentazione | » | 212 |
| 8.3.3. Determinazione dell'istante di primo arrivo delle onde sismiche | » | 213 |
| 8.3.4. Modalità di restituzione dei risultati | » | 217 |
| 8.3.5. Prova down-hole (DH) | » | 218 |
| 8.3.6. Prova cross-hole (CH) | » | 224 |

| | | |
|--|---|-----|
| 8.3.7. Prova con il cono sismico (SCPT) e con il dilatometro sismico (SDMT)..... | » | 228 |
| 8.3.8. Suspension P-S Velocity Logging Method (SVLM) | » | 231 |
| 8.4. Misure sismiche superficiali | » | 235 |
| 8.4.1. Rifrazione e riflessione sismica | » | 237 |
| 8.4.2. Metodi basati sulle onde sismiche di superficie (Surface Waves Methods, SWM)..... | » | 247 |
| 8.5. Confronti tra le prove sismiche in foro e superficiali..... | » | 261 |
| 8.6. Riassunto del capitolo | » | 266 |
| 8.7. Riferimenti bibliografici | » | 267 |

Capitolo 9 – Prove dinamiche e cicliche di laboratorio

| | | |
|--|---|-----|
| 9.1. Introduzione..... | » | 273 |
| 9.2. Schematizzazione delle azioni sismiche in laboratorio e significatività dei risultati | » | 275 |
| 9.3. Apparecchiature e tecniche di prova..... | » | 276 |
| 9.4. Bender elements (BE) | » | 279 |
| 9.5. Prova di Colonna Risonante (RC)..... | » | 282 |
| 9.5.1. Obiettivi della prova | » | 283 |
| 9.5.2. Descrizione della prova | » | 283 |
| 9.5.3. Basi teoriche | » | 284 |
| 9.5.4. Principio di funzionamento..... | » | 285 |
| 9.5.5. Apparecchiatura di prova | » | 291 |
| 9.5.6. Procedura di prova | » | 293 |
| 9.5.7. Rappresentazione dei risultati..... | » | 294 |
| 9.6. Prova di Taglio Torsionale Ciclico (CTS)..... | » | 295 |
| 9.6.1. Obiettivi della prova | » | 295 |
| 9.6.2. Principio di funzionamento..... | » | 295 |
| 9.6.3. Apparecchiatura di prova | » | 296 |
| 9.6.4. Prove di colonna risonante e taglio torsionale ciclico | » | 297 |
| 9.6.5. Rappresentazione dei risultati..... | » | 297 |
| 9.7. Prova Triassiale Ciclica (TXC)..... | » | 297 |
| 9.7.1. Obiettivi della prova | » | 299 |
| 9.7.2. Descrizione dell'apparecchiatura e principio di funzionamento | » | 299 |
| 9.7.3. Modalità di prova | » | 301 |
| 9.7.4. Schemi di carico e stati di sforzo | » | 301 |
| 9.7.5. Rappresentazione dei risultati..... | » | 303 |
| 9.8. Prova di Taglio Semplice Ciclico (CSS)..... | » | 306 |
| 9.8.1. Obiettivi della prova | » | 308 |
| 9.8.2. Principio di funzionamento..... | » | 308 |
| 9.8.3. Condizioni di prova e stati di sforzo..... | » | 311 |
| 9.8.4. Confronto tra i risultati delle prove di taglio semplice ciclico e di prove triassiali cicliche | » | 312 |
| 9.8.5. Rappresentazione dei risultati..... | » | 313 |
| 9.9. Prova di Torsione Ciclica (CT) | » | 313 |
| 9.10. Riassunto del capitolo | » | 315 |
| 9.11. Riferimenti bibliografici | » | 317 |
| Postfazione | » | 323 |
| Bibliografia generale | » | 325 |
| Indice dei simboli utilizzati..... | » | 347 |
| Indice analitico | » | 349 |

PREMESSA

Almeno in apparenza, questo libro parte svantaggiato. Per tre ragioni.

La prima è che la Dinamica dei Terreni è un ramo dell'Ingegneria Geotecnica terribilmente complicato, che costringe a continui esercizi di perplessità. Richiede perciò pazienza intellettuale, distensione della mente e, soprattutto, lentezza. In un'epoca sbrigativa è, perciò, *fuori tempo*.

La seconda ragione è che, nell'area dell'Ingegneria Civile, la Dinamica dei Terreni è ancora una disciplina che non rientra nell'area del sapere atavico dell'Ingegneria Civile. Il testo deve, quindi, ricostruire un retroterra vasto e poco conosciuto, andando contro la diffusa tendenza a dare elementi di sola utilità pratica. In un'era utilitaristica un testo che costringe ad entrare nelle pieghe della materia è, perciò, un libro *impopolare*.

La terza ragione consiste nel fatto che è il primo testo di Dinamica dei Terreni in lingua italiana. Di fronte a una mole sterminata di ricerche teoriche, sperimentali e applicative e a una disciplina ancora in piena crescita, chi parte per primo si muove in maniera incerta, esita e deve spesso ricominciare da capo. Si espone perciò a tutti i rischi: incompiutezza, cripticità, astrattezza, mancata citazione. In breve, è un libro *senza rete di protezione*.

Ci sono, tuttavia, anche molte ragioni a giustificare l'uscita.

Chi ha avuto la sorte di incrociare la Dinamica dei Terreni non può che essere stato affascinato da questo lussureggiante campo della ricerca ingegneristica. La Dinamica dei Terreni, è, infatti, ben più che una disciplina. È una *forma mentis*, è un prisma di lettura dei tanti fenomeni fisici che avvengono alle diverse scale, da quella dell'elemento di volume a quella del territorio, un mirabile panottico da cui è possibile intravedere legami nascosti, nessi di causalità e altri aspetti della realtà fisica non facilmente conoscibili. Ma è, soprattutto, un'entusiasmante palestra di allenamento alla dinamica del pensiero ingegneristico, da sempre costretto a viaggiare tra i vasi di ferro del rigore e dell'approssimazione, della teoria e della pratica, della scienza e dell'arte. È quindi una disciplina *utile*.

Non è, perciò, un caso che nel campo della Dinamica dei Terreni si siano impegnati, in un avvincente confronto dialettico, negli ultimi quarant'anni, studiosi e ricercatori di tutto il mondo. Un confronto dalle salde radici ma ancora in piena fioritura e di cui questo libro riporta risultati e tendenze. È quindi un libro *attuale*.

Ma, soprattutto, ci sono, oggi, molte istanze che premono per una più ampia diffusione delle conoscenze di Dinamica dei Terreni. La cultura della prevenzione nelle zone sismiche ha da sempre trovato in questa disciplina una insostituibile e validissima alleata. Ma se è vero che la prevenzione sismica è innanzitutto una cultura, è necessario, perché questa cultura si diffonda, che venga reso accessibile al maggior numero di persone il più alto livello possibile di conoscenza. Prescrivendo che la protezione sismica debba cominciare dalla verifica di adeguatezza del sito e

del terreno di fondazione, il D.M. 14 gennaio 2008 ha formalmente sancito il carattere di *necessità* della Dinamica dei Terreni nella cultura ingegneristica. In questa luce, il volume, forse, non diventerà popolare, ma acquista pieno *diritto di cittadinanza*.

È in questo spirito che con l'Ing. Johann Facciorusso abbiamo tentato di dare una sistemazione ragionata a quella mole di conoscenze faticosamente acquisite da centinaia di ricercatori e studiosi di tutto il mondo e che sono stati per me oggetto di attenzione fin dal loro momento inaugurale.

Il libro, pur avendo come base le lezioni di Dinamica dei Terreni da me tenute per molti anni nell'Università di Firenze, è stato anche il frutto di un lavoro condiviso della Sezione Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze, che si è alimentato degli scambi e delle ricerche condotte nel campo della Dinamica dei Terreni e dell'Ingegneria Geotecnica Sismica con i colleghi della Sezione Geotecnica, in particolare con il Prof. Giovanni Vannucchi, la Prof. Claudia Madiati, l'Ing. Johann Facciorusso e l'Ing. Giacomo Simoni, con i quali abbiamo quotidianamente condiviso la passione per quest'affascinante area di studio e ai quali va la mia più affettuosa e commossa gratitudine. Uno speciale debito di riconoscenza ho verso mio marito Umberto Allegretti e i miei figli Giovanni e Francesco che di questo lavoro hanno portato più i pesi che potuto compatirne gli entusiasmi e le gioie.

Teresa Crespellani

OBIETTIVI E ORGANIZZAZIONE DEL VOLUME

L'oggetto della Dinamica dei Terreni è lo studio del comportamento tensionale e deformativo del mezzo *terreno* in presenza di azioni dinamiche e/o cicliche. Un tema che, come la pratica dimostra, è di fondamentale importanza per la soluzione di molti problemi ingegneristici, quali la progettazione delle fondazioni di macchine, lo studio degli effetti indotti dalle vibrazioni prodotte dal traffico, il calcolo delle strutture di fondazione nelle zone sismiche, la previsione degli effetti locali dei terremoti, ecc., e che per tale motivo, specie negli ultimi decenni, ha attratto l'attenzione di studiosi e ricercatori di tutto il mondo per individuare strategie di approccio specifiche per i problemi *dinamici*.

Di fronte all'infinita e variegata mole di ricerche scientifiche che hanno favorito lo sviluppo della disciplina e che rende oggi praticamente impossibile la ricostruzione anche sintetica del processo di stratificazione delle conoscenze, la scelta degli Autori è stata quella di circoscrivere l'ambito di interesse all'esame di quei particolari tratti del comportamento tensionale e deformativo che sono rilevanti per la comprensione degli effetti locali indotti dai terremoti e per la previsione della risposta sismica nei depositi reali con le procedure messe a punto nell'ambito dell'Ingegneria Geotecnica Sismica.

Ma, anche circoscrivendo il campo d'indagine a questo particolare settore dell'Ingegneria, il materiale di studio appariva sconfinato. Infatti, negli anni '70, l'esigenza di tenere conto del rischio sismico nella progettazione di opere importanti (centrali nucleari, grandi dighe, depositi di materiali tossici, ecc.) ha portato ad intrecciare tra loro, nei loro tanti aspetti teorici, analitici, sperimentali, strumentali, applicativi, discipline complesse come la Sismologia, la Dinamica delle Strutture e la Geotecnica, dando vita, di fatto, ad una nuova disciplina, l'Ingegneria Geotecnica Sismica, incentrata su una molteplicità di osservazioni e di studi che, negli anni, si sono concretizzati in un numero sterminato di pubblicazioni, conferenze internazionali, congressi, corsi, seminari, ecc.

Si è scelto perciò di delimitare ulteriormente l'area di indagine, concentrando l'attenzione solamente su quegli aspetti *basici* della Dinamica dei Terreni la cui conoscenza è apparsa agli Autori indispensabile per le applicazioni dell'Ingegneria Geotecnica Sismica, e cioè i comportamenti tensionali e deformativi esibiti dai vari materiali *in laboratorio* in prove su piccoli campioni sottoposti ad azioni simulanti le azioni sismiche.

Una decisione aggiuntiva è stata quella di soffermarsi solamente su quei risultati che sono di maggiore interesse ai fini applicativi, accennando, invece, solo brevemente a risultati di ricerche più puntuali e/o di rilievo soprattutto scientifico. Questa scelta è risultata penalizzante soprattutto per la comunità scientifica italiana, i cui contributi scientifici non hanno potuto trovare nel testo lo spazio che avrebbero meritato.

L'obiettivo del volume non è, infatti, quello di fornire uno stato dell'arte (peraltro impossibile vista la rapidità di crescita della produzione scientifica), bensì quello di ricostruire a larghi tratti una tela di fondo in cui collocare i problemi che la progettazione e la realizzazione di opere può porre all'ingegnere in precisi contesti sismici e normativi, porgendogli elementi di riflessione così che, riposizionando il materiale offertogli in circostanze nuove, possa dare egli stesso una risposta alle sue domande.

Dopo un breve inquadramento delle peculiarità dei problemi geotecnici *dinamici* rispetto ai problemi *statici* e l'introduzione di alcuni concetti di base (capitolo 1), il testo richiama i principi fondamentali della teoria delle vibrazioni e della teoria di propagazione delle onde elastiche nei mezzi continui (capitolo 2) strettamente indispensabili per lo studio del comportamento tensionale e deformativo dei terreni in presenza di carichi dinamici e ciclici.

Vengono quindi separatamente analizzati gli effetti della ciclicità e della velocità di applicazione dei carichi sul comportamento del terreno (capitolo 3) in relazione ai differenti livelli deformativi raggiunti durante l'applicazione di sollecitazioni simulanti le azioni sismiche (capitolo 4).

Con particolare riferimento al comportamento ad elevate deformazioni e alle condizioni di rottura, vengono esaminati separatamente i comportamenti dei terreni a grana grossa (capitolo 5) e dei terreni a grana fine (capitolo 6).

Infine, vengono discussi i principali modelli dinamici e ciclici (capitolo 7), le prove in sito (capitolo 8) e in laboratorio per la misura dei parametri dinamici (capitolo 9).

Al termine di ogni capitolo sono riportati i riferimenti bibliografici ivi richiamati. La bibliografia complessiva, riportata alla fine del volume, contiene anche i riferimenti ad alcuni lavori più recenti pubblicati sugli argomenti trattati.

CAPITOLO 1

CARATTERISTICHE DEI PROBLEMI DINAMICI

1.1. LA DINAMICA DEI TERRENI E LE SUE APPLICAZIONI

Fin dalla fine dell'800, specie con lo sviluppo industriale e l'impiego di macchine vibranti, nella pratica ingegneristica delle costruzioni si è avvertita la necessità, in presenza di carichi dinamici, di approcci concettuali e teorici diversi da quelli correntemente impiegati in presenza di carichi statici. Tale esigenza ha portato nel tempo anche alla messa a punto di specifiche tecniche di sperimentazione e di misurazione per i problemi tipicamente *dinamici*.

Gli approcci teorici e anche talune apparecchiature, inizialmente studiati nell'ambito dell'Ingegneria Strutturale, sono stati poi estesi, con opportune modificazioni, anche al caso di problemi di Dinamica delle Fondazioni (Barkan, 1962; Richart, 1962; Woods, 1968; Richart et al., 1970), formando le prime basi di quel vasto ramo dell'Ingegneria Geotecnica, oggi denominato *Dinamica dei Terreni*, che ha per oggetto lo studio, alle diverse scale (micro-macro-mega elemento), del comportamento tensionale e deformativo dei terreni in presenza di azioni dinamiche e/o cicliche.

Uno speciale impulso allo sviluppo della Dinamica dei Terreni è venuto, negli anni '60-'70, dalle prime ricerche sistematiche condotte nell'ambito della difesa dai terremoti. Particolarmente significativi sono stati i contributi scientifici della scuola di Berkeley (USA), che fin dagli anni '50 aveva cominciato a studiare e realizzare delle apparecchiature sperimentali e delle tecniche di misurazione in sito e in laboratorio in grado di misurare anche piccolissime deformazioni di taglio ($\gamma < 1 \cdot 10^{-4} \%$) per lo studio delle proprietà dei terreni in condizioni sismiche (Seed and Lundgreen, 1954; Seed e Fead, 1959; Seed, 1960; Seed e Chan, 1966).

Altrettanto fondamentali per lo sviluppo della disciplina sono state le ricerche e le osservazioni sperimentali condotte dai ricercatori giapponesi della scuola di Tokyo, da sempre impegnati nella difesa dai terremoti, ma che, soprattutto dopo il terremoto di Niigata del 1964, hanno promosso sistematiche sperimentazioni in sito e in laboratorio con apparecchiature geotecniche sempre più avanzate, aprendo varchi importanti nella conoscenza dei fenomeni fisici indotti dai terremoti e in particolare sui meccanismi della liquefazione nelle sabbie sature (Ishihara e Li, 1972; Ishihara e Yasuda, 1972, 1973, 1975; Tatsuoka e Ishihara, 1974; Ishihara et al., 1975).

A partire dagli eventi altamente distruttivi che colpirono l'Alaska e il Giappone nel 1964 (terremoto di Niigata e di Anchorage) e, negli anni successivi, altri importanti centri urbani (citiamo in particolare i terremoti di Caracas, 1967, S. Fernando, 1971, Città del Messico, 1985, Loma Prieta, 1989, Northridge, 1994, Kobe, 1995), gli studi teorici e sperimentali sul comportamento dei terreni in presenza di carichi dinamici e ciclici si sono moltiplicati in modo vertiginoso, mettendo sempre più in luce la rilevante incidenza delle proprietà dinamiche dei terreni sul danneggiamento osservato. Anche in Italia, soprattutto dopo i terremoti del Friuli (1976) e dell'Irpinia

(1980) e nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica (CNR, 1976-1981), le ricerche sul comportamento dinamico dei terreni hanno avuto un crescente sviluppo (Audoly e Crespellani, 1970; Vinale, 1978; Faccioli, 1979, 1981, 1986; Croce e Vinale, 1980; Burghignoli, 1983; Nova, 1983; D'Elia, 1983; Dente, 1983; Maugeri, 1983; Vannucchi e Ghinelli, 1983; Crespellani, 1986, 1988; Ghionna, 1989; Pasqualini, 1989; Silvestri et al., 1989).

Negli anni, oltre al perfezionamento delle apparecchiature per la misura dei parametri dinamici a piccoli livelli deformativi ($\gamma < 1 \cdot 10^{-4} \%$), sono state messe a punto anche altre apparecchiature geotecniche di specifico interesse per le applicazioni di Ingegneria Geotecnica Sismica, al fine di potere analizzare il comportamento dei terreni in presenza di azioni dinamiche e cicliche nel campo delle medie e alte deformazioni ($1 \cdot 10^{-4} \% < \gamma < 5 \cdot 10^{-1} \%$) e a rottura.

L'impiego sistematico di tali apparecchiature per scopi di ricerca scientifica non solo ha fatto chiarezza su molti aspetti fondamentali del comportamento dei terreni in campo dinamico ma ha rivelato che tali apparecchiature sono di grande utilità anche per la progettazione corrente e la realizzazione di opere ingegneristiche nelle zone sismiche e perfino in campo statico.

Parallelamente alla sperimentazione in sito e in laboratorio, sono stati anche elaborati numerosi metodi, talora incorporati in codici di calcolo, che hanno permesso di dare soluzione ad una estesa varietà di problemi ingegneristici tipicamente *dinamici*, quali ad esempio (figura 1.1):

- la progettazione delle fondazioni di macchine, turbine, antenne radar, impianti industriali, centrali nucleari;
- lo studio degli effetti indotti dalle vibrazioni prodotte dal traffico stradale e ferroviario, da macchine di cantiere, da sonde, magli, infissione di pali e di diaframmi, ecc.;
- l'analisi degli effetti di esplosioni (accidentali e provocate);
- la progettazione di strutture *offshore* in presenza di azioni sismiche e/o moti ondosi eccezionali;
- il calcolo delle strutture di fondazione nelle zone sismiche;

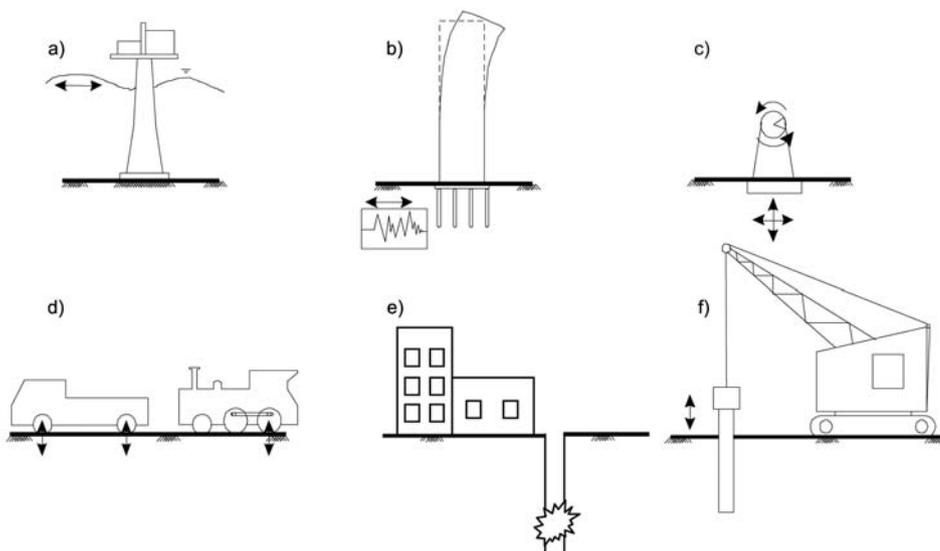


Figura 1.1. Situazioni in cui il terreno è sollecitato da carichi dinamici e ciclici: a) strutture offshore; b) terremoti; c) macchine industriali; d) traffico stradale e ferroviario; e) esplosioni; f) miglioramento dei terreni (da O'Reilly e Brown, 1991, mod.)

- la previsione degli effetti locali dei terremoti (frane, fenomeni di liquefazione del terreno, cedimenti ed effetti di amplificazione locale della risposta sismica);
- la messa a punto di tecniche di miglioramento dei terreni con metodi dinamici;
- l'esplorazione dei terreni con metodi geofisici.

L'approccio ingegneristico al dimensionamento delle opere geotecniche in presenza di carichi dinamici e la previsione degli effetti indotti nel terreno e nelle costruzioni adiacenti, richiedono infatti che vengano condotte analisi tipicamente *dinamiche* (solo in casi molto semplici si può ricorrere ad analisi pseudostatiche), in cui si tenga conto della variabilità nel tempo sia dei carichi dinamici sia delle risposte in termini di deformazioni, spostamenti, ecc., ricorrendo anche, in alcuni casi, a strategie di approccio generalizzate, in cui, cioè, si tiene conto della direzione e dell'entità dei tre sforzi principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Per la complessità della risposta dei terreni ai carichi dinamici, soprattutto in condizioni sismiche, nella pratica ingegneristica le analisi sono oggi per lo più condotte ricorrendo a opportuni codici di calcolo, specifici per ogni problema.

Ma, sia che si ricorra a codici di calcolo sia che il problema venga trattato in forma chiusa o con procedure più o meno approssimate, occorre sempre disporre di un modello reologico che tenga conto delle peculiarità del legame sforzi-deformazioni in campo dinamico e ciclico (cioè *non linearità e irreversibilità*) ed è sempre essenziale la conoscenza di alcuni parametri rappresentativi del comportamento del terreno in presenza dei carichi dinamici, quali la rigidità, lo smorzamento e/o la resistenza.

Tali parametri sono diversi a seconda del problema specifico e devono essere determinati in particolari condizioni di drenaggio e di livello deformativo mediante prove simulanti più da vicino possibile le condizioni del terreno in sito prima, durante e dopo l'applicazione dei carichi dinamici.

A causa della grande varietà di condizioni possibili, ognuna delle quali richiede una trattazione specifica, nel presente volume si focalizzerà l'attenzione solo su quei comportamenti del terreno che sono di interesse per la comprensione dei fenomeni fisici indotti dai terremoti e per le applicazioni dell'Ingegneria Geotecnica Sismica.

1.2. CARICHI DINAMICI E CICLICI

Nonostante le peculiarità che caratterizzano i problemi ingegneristici oggetto della Dinamica dei Terreni, vi sono alcuni aspetti comuni alla progettazione delle opere geotecniche in campo dinamico che merita evidenziare, anche per fare risaltare meglio le differenze tra i problemi cosiddetti statici e i problemi dinamici.

Partiremo da alcune precisazioni terminologiche che affondano su distinzioni concettualmente significative sotto il profilo delle caratteristiche comportamentali dei terreni associate alla presenza di carichi statici o dinamici. Con il termine *carichi* in seguito si indicheranno sia le forze direttamente applicate (concentrate o distribuite), sia le azioni indirette indotte da spostamenti impressi, cedimenti, ecc.

1.2.1. Carichi dinamici

Secondo la terminologia corrente, vengono denominati *carichi dinamici* quei carichi, concentrati o distribuiti, la cui ampiezza e/o direzione e/o punto di applicazione è variabile nel tempo e che, di conseguenza, inducono stati tensionali e deformativi anch'essi variabili nel tempo.

Come ben noto, però, in ambito geotecnico esistono molte situazioni in cui i carichi applicati sul terreno variano nel tempo (per esempio nella fase di costruzione di un rilevato, nei terreni sottostanti un serbatoio, nelle fondazioni di strutture con carichi accidentali molto variabili, ecc.), senza che siano necessari approcci differenti da quelli usati in presenza di carichi tipicamente *statici*.

Nella Dinamica dei Terreni l'aggettivo *dinamico* viene essenzialmente associato al tempo di applicazione del carico (*time of loading*) o, alternativamente, alla velocità di applicazione (*rate velocity*) ed è riservato a quei carichi in cui il tempo di applicazione è così ridotto (o, alternativamente, la cui velocità è così elevata) che non è più lecito trascurare le forze di inerzia e gli effetti che, in un terreno, si associano alla velocità di deformazione (*strain-rate effects*), cioè le modifiche delle condizioni di drenaggio, gli effetti viscosi e gli effetti di interazione (*risonanza*) tra vibrazioni indotte e terreno attraversato. È da notare che, nel linguaggio specifico, per *tempo di applicazione* si intende convenzionalmente un intervallo di tempo uguale a un quarto del periodo T della sequenza di carico, cioè un quarto del tempo necessario per una inversione completa (Ishihara, 1996). I problemi in cui l'applicazione del carico è superiore a una decina di secondi sono considerati *statici* e quelli in cui il tempo di applicazione del carico è inferiore sono considerati *dinamici*.

Come si può osservare nella figura 1.2, rispetto ai tempi di applicazione dei carichi statici, i tempi di applicazione dei carichi che vengono definiti dinamici sono di molti ordini di grandezza minori¹.

Nelle prove geotecniche di laboratorio di tipo dinamico (ad esempio nelle prove di colonna risonante), la velocità di deformazione può essere dell'ordine di $10^3\%/s$, cioè di diversi ordini di grandezza superiore alla velocità di deformazione in condizioni statiche ($0.1\%/s$).

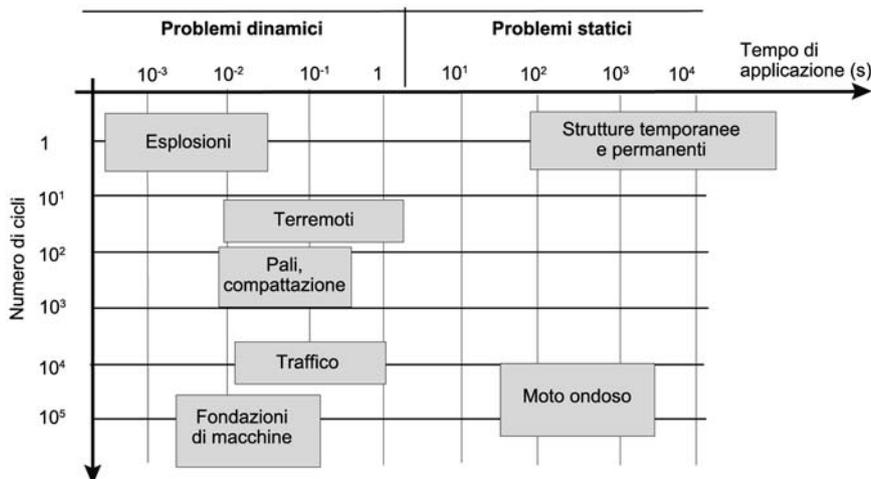


Figura 1.2. Tempi di applicazione e campi di frequenza dei principali tipi di carichi dinamici

¹ È da sottolineare che in laboratorio si possono raggiungere velocità di applicazione dei carichi superiori ad oltre 10^5 volte quelle corrispondenti all'applicazione di carichi statici.

In presenza di carichi dinamici il comportamento del terreno è molto più complesso che in condizioni statiche.

Come si vedrà nei successivi capitoli, nei terreni saturi poco permeabili, infatti, l'applicazione veloce dei carichi non consente alle pressioni interstiziali in eccesso di dissiparsi, l'acqua rimane intrappolata e si realizzano *condizioni non drenate*. Nei terreni sabbiosi, l'effetto risultante può essere quello di un incremento e accumulo delle pressioni interstiziali e di una corrispondente drastica riduzione delle tensioni efficaci che può portare al *collasso*. Nei terreni argillosi l'effetto può essere anche di segno opposto. Lo stabilirsi di condizioni non drenate può infatti produrre una attivazione dei legami intramolecolari e un conseguente incremento della rigidezza e della resistenza a rottura.

1.2.2. Carichi ciclici

Sono definiti *ciclici* i carichi che producono un'alternanza di fasi di carico, scarico e ricarico e che si ripetono con una qualche periodicità. Nella definizione di carico ciclico possono essere inclusi sia carichi dinamici sia carichi statici. Ma è soprattutto in condizioni dinamiche che la ripetitività delle condizioni di carico, scarico e ricarico produce nel terreno effetti permanenti significativi (*effects of repetition*). Quando il numero dei cicli di carico è molto alto, anche se l'ampiezza delle oscillazioni è ridotta (come nel caso per esempio delle vibrazioni trasmesse dai veicoli), si possono di fatto accumulare nel tempo effetti deformativi ingegneristicamente non trascurabili.

I carichi dinamici ciclici possono essere *irregolari* di tipo impulsivo a frequenza molto elevata (dell'ordine di 300 Hz) e con un limitato numero di componenti in frequenza (esplosioni), o di tipo transitorio, con frequenze comprese tra 1 e 10 Hz (terremoti), oppure possono essere *regolari* di tipo vibratorio, caratterizzati da frequenze intorno a 1 Hz e cicli piuttosto uniformi (traffico, macchine industriali), o di tipo ondulatorio a bassa frequenza, inferiore a 1 Hz (moto ondoso e vento). Nella tabella 1.1 sono riportati i campi di frequenza tipici delle vibrazioni prodotte da diverse macchine e sorgenti di perturbazione.

Tabella 1.1. Campi di frequenza tipici di alcune sorgenti di vibrazione nei terreni

| Sorgente di vibrazioni | Campo di frequenza |
|---|--------------------|
| Macchine industriali | > 10 Hz |
| Traffico stradale e ferroviario | ~ 1 Hz |
| Macchine di cantiere | 10-60 Hz |
| Infissione di pali, cadute di magli, ecc. | 1-10 Hz |
| Esplosioni | > 100 Hz |
| Terremoti | 1-10 Hz |
| Vento | 0.7 Hz |
| Moto ondoso | 0.05-0.2 Hz |

La figura 1.2 e la tabella 1.1 mostrano che in generale i carichi dinamici e ciclici con frequenze più alte hanno anche tempi di applicazione più brevi e viceversa. Quando i carichi ciclici sono anche dinamici tra la frequenza f , l'ampiezza della deformazione di taglio ciclica γ e la velocità di deformazione di taglio $\dot{\gamma}$ sussiste la relazione:

$$\dot{\gamma} = 4 \cdot f \cdot \gamma \quad (1.1)$$

perciò più elevata è la frequenza maggiore è la velocità di deformazione (figura 1.3).

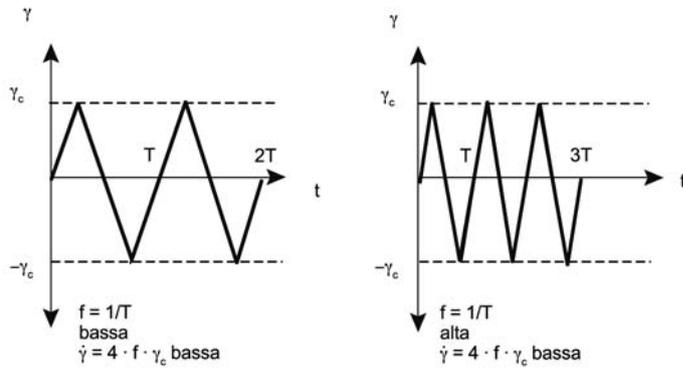


Figura 1.3
Relazione tra frequenza f , ampiezza γ_c e velocità di deformazione di taglio $\dot{\gamma}$ in presenza di un carico dinamico e ciclico

1.3. RAPPORTO TRA AMPIEZZA DEI CARICHI DINAMICI E CICLICI E INTENSITÀ DEI CARICHI STATICI

Quando un terreno è sottoposto a carichi insieme dinamici e ciclici, la compresenza delle due categorie di effetti legati alla velocità di applicazione (*rate effects*) e alla ciclicità del carico (*repetition effects*) rende il legame sforzi-deformazioni doppiamente complesso.

Tuttavia, è importante sottolineare che tale complessità è tanto maggiore quanto più i carichi dinamici e ciclici preponderano su quelli statici. È da osservare infatti che non esistono nei terreni condizioni di carico esclusivamente dinamico. Le azioni dinamiche si aggiungono sempre ad altre azioni: peso proprio, carichi permanenti e variabili delle opere geotecniche e delle sovrastanti strutture,

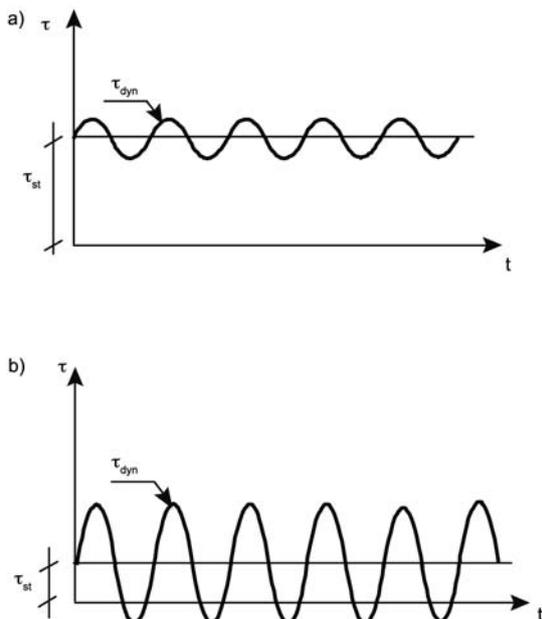


Figura 1.4. Sforzi statici iniziali e ampiezza degli sforzi dinamici e ciclici (caso non alternato, a, e caso alternato, b)

spinte dell'acqua e delle terre, ecc. Perciò, come facilmente intuibile, il legame sforzi-deformazioni dipende, nel caso di carichi dinamici monotonici, dalla velocità di applicazione del carico e, nel caso di carichi dinamici e ciclici, oltre che dalla velocità, dal rapporto che, nel caso specifico, si stabilisce fra *ampiezza dei carichi dinamici e ciclici ed entità dei carichi statici*. In base al valore di tale rapporto, il comportamento del terreno può avvicinarsi o discostarsi da quello che avrebbe in condizioni di carico puramente statico.

Se, ad esempio, in un pendio o in un deposito in cui sono presenti degli edifici, gli sforzi di taglio statici iniziali sono elevati e quelli dovuti ai carichi dinamici e ciclici hanno ampiezza ridotta, la loro combinazione dà un effetto risultante che è poco influenzato dalla presenza di questi ultimi (figura 1.4a); in caso contrario (figura 1.4b), se i carichi ciclici

hanno elevata ampiezza il comportamento del terreno è invece marcatamente governato dal susseguirsi di fasi di compressione e di estensione e dalle continue rotazioni degli assi principali². È da rilevare che, negli ultimi anni, il problema del rapporto tra carichi statici e dinamici è andato assumendo crescente importanza nell'ambito dell'Ingegneria Geotecnica Sismica. Si è infatti potuto osservare che, in relazione all'entità del rapporto fra sforzi di taglio statici precisissimi e ampiezza e durata degli sforzi indotti dal terremoto, possono aversi scenari sismici, legati ad esempio alla liquefazione dei terreni granulari saturi, di segno opposto, alcuni contrassegnati da recuperi di resistenza del terreno, altri, al contrario, associati a collassi repentini e generalizzati.

1.4. ASPETTI CHE CARATTERIZZANO LA PROGETTAZIONE DI OPERE GEOTECNICHE IN CAMPO DINAMICO

Rispetto alla progettazione geotecnica in presenza di carichi statici, la progettazione delle opere geotecniche in presenza di carichi dinamici pone una più ampia gamma di questioni ingegneristiche.

I carichi dinamici, come verrà meglio spiegato nel capitolo 2, producono nel terreno delle vibrazioni meccaniche che si propagano in tutte le direzioni, secondo fronti d'onda sferici o emisferici (a seconda che si tratti di un mezzo infinito o di un semispazio), imprimendo ai punti del mezzo attraversato dei movimenti di tipo oscillatorio intorno a una posizione di equilibrio. Si generano così delle onde progressive di sforzo e di deformazione che, per analogia con le onde generate dai terremoti, vengono denominate *onde sismiche*. Le vibrazioni si attenuano con la distanza dalla sorgente e, a meno che il sistema oscillante non riceva continuamente energia dall'esterno (come nel caso delle macchine vibranti), sono smorzate nel tempo. Il loro andamento è sempre di tipo oscillatorio, e può essere regolare o irregolare. L'entità e l'andamento, nel tempo e nello spazio, delle sollecitazioni e deformazioni cicliche indotte nel terreno dai carichi dinamici dipendono strettamente, oltre che dalle proprietà del terreno, dalla natura dei carichi dinamici. Nel capitolo 2, verranno, in particolare, illustrate le modalità di rappresentazione e interpretazione delle vibrazioni, nonché i modi con cui esse si propagano e interagiscono con un mezzo continuo ed elastico, quale può essere considerato in prima approssimazione il terreno.

In generale, la progettazione geotecnica in campo dinamico si caratterizza per il fatto che, oltre ai problemi della normale progettazione geotecnica (dimensionamento e verifica delle opere, previsione delle sollecitazioni e delle deformazioni nel terreno, calcolo degli spostamenti, ecc.), devono essere affrontate tre fondamentali categorie di *problemi tipicamente dinamici* e precisamente:

1. l'identificazione delle caratteristiche dell'eccitazione dinamica (*sorgente*);
2. l'analisi delle modalità di propagazione delle perturbazioni e lo studio delle mutue interazioni fra vibrazioni e mezzo attraversato (*mezzo di trasmissione*);
3. lo studio degli effetti indotti nell'ambiente fisico e costruito (*ricettore*).

² L'ampiezza dei carichi dinamici e ciclici può cioè essere tale da determinarne un annullamento temporaneo dello sforzo di taglio e un'inversione del verso di applicazione (*carichi dinamici ciclici alternati*), come mostrato in figura 1.4b.

1.4.1. Caratteristiche dell'eccitazione dinamica

I *carichi dinamici* sono di tipo molto vario in relazione alla natura e all'ubicazione della sorgente che li genera. Possono essere applicati in superficie (ad esempio veicoli) o interni al terreno (esplosioni, sismi, battitura di pali). Può trattarsi di pesi in caduta libera (caduta di magli), di carichi applicati continuamente nel tempo, di carichi impulsivi (con tempo di applicazione minore di 10^{-2} - 10^{-3} s), ad andamento regolare (macchine industriali) o irregolare (sismi), di breve o di lunga durata, deterministicamente definiti nelle loro caratteristiche di variabilità nel tempo e nello spazio o definiti solo in senso statistico (cioè *random*).

I carichi dinamici sono in genere anche *ciclici*. Possono essere sostanzialmente distinti in *carichi periodici* e *non periodici*. Alcune tipiche forme di carichi dinamici sono riportate nella figura 1.5, in relazione ad alcuni dei problemi dinamici illustrati in figura 1.1.

I *carichi periodici* esibiscono le stesse variazioni nel tempo per un largo numero di cicli. I carichi periodici più semplici hanno un andamento sinusoidale (*armonico*) e sono descritti completamente dall'ampiezza A e dal periodo T (o dalla frequenza $f = 1/T$). Altre forme di carico periodico sono quelle del moto ondoso. In base al teorema di Fourier, i carichi periodici possono essere rappresentati come somma di una serie di componenti armoniche semplici.

Tipici *carichi non periodici* sono quelli di tipo impulsivo, costituiti da un singolo impulso di breve durata (dovuti ad esempio a esplosioni) o anche quelli di maggiore durata (dovuti ad esempio ai terremoti). Poiché anche i carichi non periodici presentano talora una qualche periodicità, è possibile applicare l'analisi di Fourier e descriverli in forma spettrale come somma di componenti armoniche semplici.

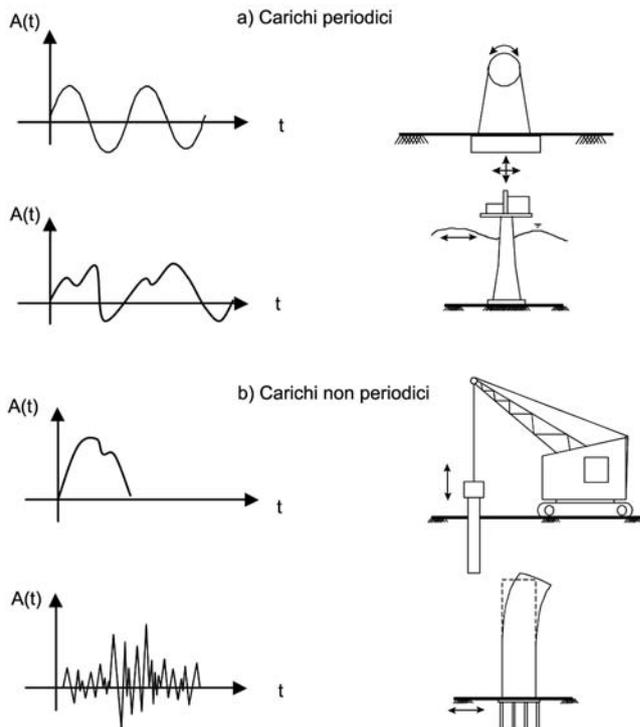


Figura 1.5. Storia temporale dell'ampiezza, $A(t)$, di alcuni tipi di carichi dinamici periodici e non periodici dovuti a diverse sorgenti

In generale, i carichi dinamici ad andamento regolare e continuativo (ad esempio le fondazioni di macchine industriali) producono *vibrazioni periodiche e regolari*; i carichi dinamici ad andamento impulsivo e casuale producono *vibrazioni irregolari*.

È da sottolineare però che, anche quando i carichi dinamici applicati al terreno sono ad andamento regolare, le vibrazioni prodotte, soprattutto ad una certa distanza dalla sorgente, possono avere un andamento irregolare nel tempo e nello spazio per effetto di fenomeni di riflessione e rifrazione all'interfaccia fra i vari strati di terreno e all'impatto con la superficie libera e/o a causa delle interazioni tra terreno e vibrazioni.

Per quanto riguarda i carichi dinamici, nella progettazione di opere geotecniche si distinguono due casi fondamentali:

- il caso in cui l'andamento dei carichi nel tempo è definito da una legge nota (sinusoidale, rettangolare, triangolare, ecc.) e specificata nelle sue componenti (ampiezza, frequenza, durata);
- il caso in cui il carico non è noto e può essere definito solo in senso *statistico*.

In quest'ultimo caso, la definizione delle caratteristiche dell'eccitazione all'origine costituisce un'operazione preliminare imprescindibile della progettazione geotecnica. Si tratta in molti casi (come ad esempio nei problemi di traffico o di ingegneria geotecnica sismica) di un problema complesso e di difficile risoluzione pratica a motivo sia delle incertezze legate alla casualità e irregolarità dei carichi sia dei molteplici fattori che governano i processi di generazione delle vibrazioni. Un modo per definire le caratteristiche dell'eccitazione può essere quello di ricorrere ad appropriati strumenti di rilevazione e registrazione (costituiti da terne di sismometri o accelerometri lungo tre direzioni ortogonali) situandoli in prossimità della sorgente – laddove ovviamente possibile – o in altri siti significativi.

Nel caso dei terremoti, la definizione delle *azioni sismiche* costituisce uno dei problemi più complessi della progettazione geotecnica ed è oggetto di studi che coinvolgono numerose discipline (Sismologia, Scienze della Terra, Ingegneria Strutturale e Geotecnica). Per agevolare i progettisti di opere strutturali e geotecniche nelle zone sismiche, le normative forniscono alcuni criteri per la stima delle azioni sismiche da considerare nella progettazione³.

1.4.2. Propagazione delle perturbazioni nel mezzo terreno e mutue interazioni tra onde sismiche e terreni

La fase successiva al rilascio di energia è quello della propagazione delle *onde sismiche* nel mezzo terreno (*mezzo di trasmissione*).

Le onde sismiche che si dipartono da una generica sorgente di vibrazione sono di due tipi: le *onde di volume* e le *onde di superficie*.

Le *onde di volume* sono direttamente generate dalla sorgente e si propagano nel mezzo secondo fronti d'onda sferici di raggio sempre più ampio. In relazione agli stati deformativi indotti nel terreno, si distinguono in *onde longitudinali* (o *onde P*, dal latino *Primae*) e *onde trasversali* (o *onde S*, dal latino *Secundae*). Le onde *P* producono successive deformazioni di compressione ed estensione, hanno velocità maggiore e raggiungono per prime la superficie libera. Le onde *S* generano deformazioni di taglio, hanno velocità minore delle onde *P* e non si trasmettono nei fluidi dal momento che questi non hanno resistenza al taglio.

Nell'impatto con la superficie libera o in corrispondenza di superfici di discontinuità, l'arrivo delle onde di volume si accompagna alla generazione di nuove onde, denominate *onde di superficie* perché interessano solamente la parte più superficiale del mezzo. Le onde superficiali sono di due tipi: *onde di Rayleigh* (Rayleigh, 1885) e *onde di Love* (Love, 1911).

Nel capitolo 2 verranno descritte le peculiarità dei vari tipi di onde sismiche, le relative modalità e velocità di propagazione, nonché il tipo di deformazioni indotte nei terreni attraversati con

³ Vedi ad esempio, il D.M. 14 gennaio 2008, capitolo 3, paragrafo 3.2 (Ministero Infrastrutture, 2008).

riferimento prima a un mezzo ideale omogeneo, isotropo e con comportamento elastico e poi con riferimento ai terreni reali, che, come noto, hanno caratteristiche peculiari difficilmente riconducibili a quelle del mezzo ideale. In particolare, come vedremo, la presenza di stratificazioni e discontinuità nel terreno determina una moltiplicazione per rifrazione e riflessione del numero e del tipo di onde sismiche, nonché una deviazione nel loro cammino di propagazione e un'attenuazione della loro ampiezza (*smorzamento per scattering*) che si somma a quella geometrica, legata all'ampliarsi del volume di terreno interessato dal passaggio delle onde (*smorzamento geometrico*). Infine, se si considera che i terreni reali hanno un comportamento molto differente da quello dei mezzi elastici e in particolare possiedono proprietà dissipative, il moto delle onde sismiche si riduce ulteriormente in ampiezza, in relazione soprattutto al loro contenuto in frequenza (*smorzamento interno*).

A questi processi di attenuazione si possono associare *fenomeni di risonanza e/o focalizzazione* delle onde sismiche, che localmente possono innescare fenomeni di esaltazione dell'ampiezza delle onde sismiche e delle vibrazioni anche a notevole distanza dalla sorgente.

Soprattutto nel caso delle onde sismiche generate dai terremoti, le storie di carico associate alla propagazione nei terreni reali sono estremamente varie e complesse, perché dipendono in modo molto stretto dalle interazioni fra la stratigrafia e la morfologia con le proprietà geotecniche dei terreni attraversati. Infatti, a causa della sua natura particellare e multifase, il terreno in presenza di carichi dinamici e ciclici modifica la struttura interna del suo scheletro solido. In condizioni non drenate, quali quelle che si verificano in condizioni di carico dinamico per effetto della elevata velocità di applicazione del carico, le modificazioni di volume non sono consentite e si ha invece una modificazione del regime delle pressioni interstiziali. Se, come accade nei depositi saturi nel caso delle esplosioni o dei terremoti, le caratteristiche delle vibrazioni sono tali da produrre elevate deformazioni di taglio, le proprietà meccaniche del terreno (rigidezza e resistenza) subiscono, per effetto delle variazioni del regime delle pressioni interstiziali e di eventuali fenomeni di fatica, una *degradazione* che può essere così marcata e irreversibile da modificare a sua volta le caratteristiche delle onde sismiche riducendone in particolare la velocità di propagazione. Questa riduzione della velocità di propagazione produce un incremento delle deformazioni di taglio che a sua volta accelera il processo di decadimento delle proprietà del terreno. Questa circolarità di effetti può tradursi in una generale non linearità e irreversibilità nel comportamento sforzi-deformazioni che complicano notevolmente il quadro delle leggi di propagazione.

Solo in casi molto semplici, i processi di propagazione nei terreni reali possono essere trattati in forma chiusa. In generale, si ricorre a drastiche schematizzazioni dei fenomeni fisici reali e ad approcci numerici, oppure ad approcci sperimentali attraverso la registrazione delle vibrazioni alle distanze di interesse per il problema ingegneristico in esame.

1.4.3. Effetti indotti nell'ambiente fisico e costruito

Quando le onde sismiche raggiungono la superficie di un deposito sia gli strati di terreno più superficiale interessati dal passaggio di energia sia le sovrastanti costruzioni sono soggetti a vibrazioni e ad effetti che si manifestano prevalentemente in termini di oscillazioni, libere o forzate, e di deformazioni del terreno e della struttura (figura 1.6).

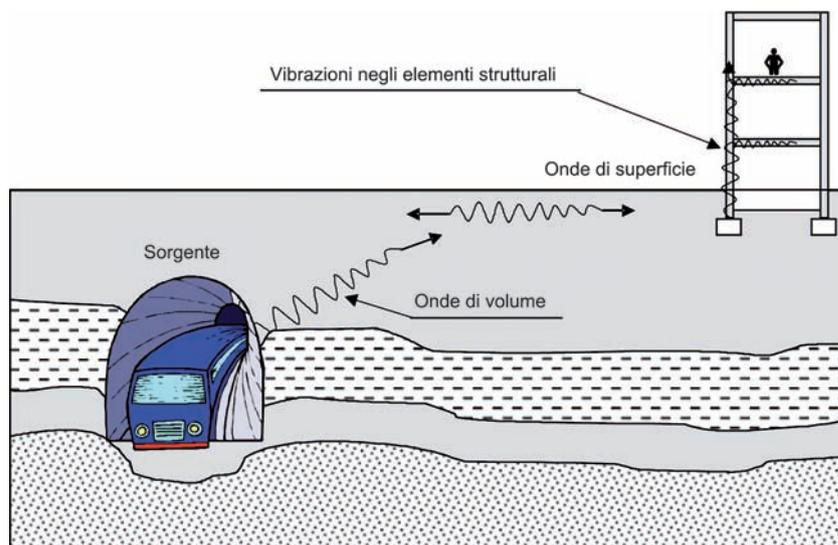


Figura 1.6. Propagazione di onde sismiche da una sorgente nel terreno e interazione con le strutture

In relazione ai periodi propri di vibrazione del terreno di fondazione e/o delle strutture, le vibrazioni indotte possono subire un'amplificazione o un'attenuazione.

Nel caso che la frequenza fondamentale delle vibrazioni si avvicini alla frequenza fondamentale del terreno di fondazione e/o della struttura si possono avere fenomeni di *risonanza*, che in condizioni estreme possono compromettere la stabilità e, in condizioni meno critiche, comportare danni alle strutture e disagi alle persone.

Gli effetti indotti a distanza da una sorgente di vibrazioni sono in genere descritti in termini di accelerazione (o spostamento) e possono essere rilevati mediante terne di accelerometri (o di sismometri) disposti secondo tre direzioni ortogonali.

Dal punto di vista della Dinamica dei Terreni e dell'Ingegneria Geotecnica Sismica, interessano soprattutto gli effetti indotti in termini di modificazioni degli stati di sforzo e deformazione e di modificazioni del regime delle pressioni interstiziali nel terreno di fondazione e/o nelle opere geotecniche. Perciò gli effetti a distanza devono essere rilevati ricorrendo anche all'installazione di strumenti geotecnici di osservazione (assestimetri, piezometri, ecc.).

Anticipando quanto verrà esposto più dettagliatamente nel seguito, è da rilevare che in campo dinamico le deformazioni potenzialmente più critiche per la stabilità dei terreni e delle opere geotecniche sono le deformazioni di taglio γ dovute al passaggio delle onde S .

Come noto, in un elemento di volume gli sforzi possono essere sempre scomposti in una componente *isotropa* e in una componente *deviatorica*. Quando i carichi applicati sono ciclici, le deformazioni dovute alla componente isotropa risultano reversibili perciò è la deformazione deviatorica a controllare il comportamento del terreno. Queste considerazioni portano a concentrare l'attenzione sul legame sforzi deformazioni in termini di sollecitazioni e deformazioni di taglio nel piano τ, γ .

Uno degli obiettivi primari della progettazione geotecnica in campo dinamico è quello di contenere le ampiezze delle deformazioni di taglio indotte dai carichi dinamici al di sotto di *soglie* ritenute potenzialmente critiche per il problema in esame.

1.5. DIFFERENZE TRA I PROBLEMI GEOTECNICI IN CAMPO STATICO E DINAMICO

Sulla base di quanto detto, gli elementi essenziali che distinguono, in Geotecnica, i problemi dinamici da quelli statici possono essere così sintetizzati:

- a) essendo i carichi dinamici variabili nel tempo, anche gli sforzi e le deformazioni su ogni elemento di volume sono funzioni del tempo; di conseguenza, poiché su ogni elemento di volume si sviluppano forze di inerzia, le equazioni che governano la distribuzione spaziale degli sforzi e delle deformazioni sono *equazioni d'onda* che non hanno un'unica soluzione, ma una successione di soluzioni che si riferiscono ai tempi di interesse nel caso specifico;
- b) essendo i carichi dinamici applicati molto velocemente, non si possono trascurare gli effetti che conseguono nel terreno ad una applicazione veloce dei carichi in un mezzo multifase e legati principalmente allo stabilirsi di condizioni non drenate e cioè effetti di incremento delle pressioni interstiziali, attivazione di effetti viscosi, effetti di risonanza;
- c) oltre che variare nel tempo, gli sforzi $\sigma(t)$ e le deformazioni $\epsilon(t)$ sono di *natura ciclica*, il che comporta una continua successione di fasi di carico, scarico e ricarico (le azioni statiche invece inducono carichi prevalentemente monotoni o al più con qualche ciclo di scarico e ricarico); pertanto, il legame sforzi-deformazioni ha generalmente un andamento non lineare e inoltre, superate certe soglie deformative – a causa di fenomeni quali l'accumulo delle pressioni interstiziali, lo sviluppo di deformazioni irreversibili, la variazione della rigidità e la degradazione ciclica della resistenza – il comportamento del terreno dipende strettamente dall'ampiezza e dal numero dei cicli di carico;
- d) nei problemi applicativi le caratteristiche dei carichi dinamici sono per lo più sconosciute (infissione di pali, traffico, esplosioni, terremoti, ecc.) mentre nei problemi statici i carichi costituiscono un dato del problema. Nella maggior parte dei problemi dinamici pertanto uno dei passi fondamentali essenziali di uno studio geotecnico è proprio la definizione delle caratteristiche (ampiezza, frequenza, ecc.) dei carichi dinamici e/o delle azioni che possono essere indotte nel terreno;
- e) nei problemi dinamici il cammino di propagazione e le caratteristiche del mezzo attraversato influenzano in modo determinante gli effetti a distanza prodotti da una sorgente di vibrazioni; benché tali effetti sull'ambiente umano, fisico e costruito possano essere molto vari, ai fini della progettazione geotecnica tali effetti devono essere valutati in termini di spostamenti, cedimenti e deformazioni;
- f) nei problemi dinamici è la deformazione di taglio a governare il comportamento del terreno; perciò, da un punto di vista ingegneristico il problema principale ai fini della sicurezza delle opere geotecniche è quello di prevedere e limitare le deformazioni di taglio che possono essere indotte nel terreno dai carichi dinamici e ciclici;
- g) nei problemi statici i livelli di deformazione nei terreni di fondazione in condizioni di esercizio sono in genere molto piccoli; nei problemi dinamici i livelli deformativi indotti dalle sollecitazioni dinamiche coprono un campo molto vario e, soprattutto nel caso di sollecitazioni dinamiche *artificiali* (quali vibrazioni di macchine) ovvero *naturali* (quali ad esempio terremoti), sono di rilevante interesse ingegneristico anche livelli deformativi dell'ordine di 10^{-5} - $10^{-4}\%$, molto più piccoli di quelli che è possibile indagare con le usuali apparecchiature geotecniche in campo statico (prove di laboratorio triassiali, edometriche e di taglio).

1.6. CONTINUITÀ COMPORTAMENTALE DEI TERRENI NEL PASSAGGIO DA CONDIZIONI DI CARICO STATICO A CONDIZIONI DI CARICO DINAMICO

Nonostante le differenze sopraindicate tra problemi statici e problemi dinamici, è però importante sottolineare, a chiusura di questo capitolo introduttivo, che, benché il comportamento del terreno in presenza di carichi statici e dinamici sia molto diverso, da un punto di vista strettamente geotecnico non ha significato contrapporre le proprietà dinamiche di un terreno alle sue proprietà statiche. Il caso statico si può anzi considerare un caso limite nell'ambito dei problemi dinamici.

La distinzione che spesso si adotta nel linguaggio corrente (e che per brevità talora adoteremo anche in questo volume) fra *comportamento statico* e *comportamento dinamico*, è sul piano terminologico e concettuale inesatta e può anche essere fuorviante perché potrebbe lasciare intendere che vi sia una discontinuità di comportamento dei terreni nelle due condizioni di carico. La transizione tra i due comportamenti estremi (caso di presenza di soli carichi statici e presenza di carichi dinamici e ciclici molto influenti) avviene in modo graduale e continuo e, almeno in teoria, la risposta in termini di legame sforzi-deformazioni potrebbe essere riconducibile ad un unico modello reologico. È perciò più corretto parlare di *comportamento in presenza di carichi statici* e di *comportamento in presenza di carichi dinamici*.

Inoltre, non si può non rilevare che esistono delle similarità negli approcci teorici ai problemi statici (per esempio il *problema di Boussinesq*, 1885) e ai corrispondenti problemi dinamici (*problema di Lamb*, 1904) e che, anzi, frequentemente, la soluzione data al problema statico serve talora come verifica della soluzione trovata per il corrispondente caso dinamico.

È poi ben noto che, anche oggi, per la soluzione di alcuni problemi dinamici *semplici*, ci si riferisce, in prima approssimazione, a condizioni *pseudostatiche*, in cui cioè i carichi dinamici vengono trasformati in forze statiche *equivalenti*.

1.7. RIASSUNTO DEL CAPITOLO

- I. La Dinamica dei Terreni ha per oggetto lo studio, alle diverse scale (micro-macro-mega elemento), del comportamento tensionale e deformativo dei terreni in presenza di azioni dinamiche e/o cicliche.
- II. Per la complessità e la numerosità dei fattori che influenzano la risposta dei terreni ai carichi dinamici, le analisi sono oggi per lo più condotte generalmente ricorrendo a opportuni codici di calcolo, specifici per ogni problema, per l'applicazione dei quali è sempre essenziale disporre di un modello reologico che tenga conto delle peculiarità del legame sforzi-deformazioni in campo dinamico (non linearità e irreversibilità) e la conoscenza di alcuni parametri rappresentativi del comportamento del terreno in presenza dei carichi dinamici (rigidezza, smorzamento e/o resistenza) che devono essere determinati mediante specifiche prove in sito e in laboratorio.
- III. Alcuni tra i problemi ingegneristici tipicamente *dinamici* sono la progettazione delle fondazioni di macchine, lo studio degli effetti indotti dalle vibrazioni prodotte dal traffico stradale e ferroviario, da macchine di cantiere, dall'infissione di pali, l'analisi degli effetti di esplosioni (accidentali e provocate), la progettazione di strutture offshore in presenza di

- azioni sismiche e/o moti ondosi eccezionali, il calcolo delle strutture di fondazione nelle zone sismiche, la previsione degli effetti locali dei terremoti (frane, fenomeni di liquefazione del terreno, cedimenti ed effetti di amplificazione locale della risposta sismica), la messa a punto di tecniche di miglioramento dei terreni con metodi dinamici.
- IV. Secondo la terminologia corrente, vengono denominati carichi dinamici quei carichi, concentrati o distribuiti, la cui ampiezza e/o direzione e/o punto di applicazione è variabile nel tempo e che, di conseguenza, inducono stati tensionali e deformativi anch'essi variabili nel tempo. Nella Dinamica dei Terreni l'aggettivo *dinamico* viene essenzialmente associato al tempo di applicazione del carico o, alternativamente, alla velocità di applicazione ed è riservato a quei carichi in cui il tempo di applicazione è così ridotto (o, alternativamente, la cui velocità è così elevata) che non è più lecito trascurare le forze di inerzia e gli effetti che, in un terreno, si associano alla velocità di deformazione, cioè le modifiche delle condizioni di drenaggio, gli effetti viscosi e gli effetti di interazione (risonanza) tra vibrazioni indotte e terreno attraversato.
- V. Sono definiti ciclici i carichi caratterizzati da successive fasi di carico, scarico e ricarico e che si ripetono con una qualche periodicità. Nella definizione di carico ciclico possono essere inclusi sia carichi dinamici sia carichi statici. Ma è soprattutto in condizioni dinamiche che la ripetitività delle condizioni di carico, scarico e ricarico produce nel terreno effetti permanenti significativi.
- VI. Quando un terreno è sottoposto a carichi insieme dinamici e ciclici, la compresenza delle due categorie di effetti legati alla velocità di applicazione e alla ciclicità del carico rende il legame sforzi-deformazioni doppiamente complesso. Tuttavia, è importante sottolineare che tale complessità è tanto maggiore quanto più i carichi dinamici e ciclici preponderano su quelli statici. È da osservare infatti che non esistono nei terreni condizioni di carico esclusivamente dinamico. Perciò, come facilmente intuibile, la complessità del legame sforzi-deformazioni dipende, nel caso di carichi dinamici monotonici dalla velocità di applicazione del carico e, nel caso di carichi dinamici e ciclici, oltre che dalla velocità, dal rapporto che, nel caso specifico, si stabilisce fra ampiezza dei carichi dinamici e ciclici ed entità dei carichi statici. In base al valore di tale rapporto, il comportamento del terreno può avvicinarsi o discostarsi da quello che avrebbe in condizioni di carico puramente statico.
- VII. La progettazione geotecnica in campo dinamico si caratterizza per il fatto che, oltre ai problemi della normale progettazione geotecnica, devono essere affrontate tre fondamentali categorie di problemi tipicamente *dinamici* e precisamente: l'identificazione delle caratteristiche dell'eccitazione dinamica (sorgente), l'analisi delle modalità di propagazione e lo studio delle mutue interazioni fra vibrazioni e mezzo attraversato (mezzo di trasmissione) e lo studio degli effetti indotti nell'ambiente fisico e costruito (ricettore).
- VIII. Benché il comportamento del terreno in presenza di carichi statici e dinamici sia molto diverso, da un punto di vista strettamente geotecnico non ha significato contrapporre le proprietà dinamiche di un terreno alle sue proprietà statiche. Il caso statico si può anzi considerare un caso limite nell'ambito dei problemi dinamici. La transizione tra i due comportamenti estremi avviene in modo graduale e continuo, e, almeno in teoria, la risposta in termini di legame sforzi-deformazioni potrebbe essere riconducibile ad un unico modello reologico.

1.8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Audoly S., Crespellani T., 1970, *Interazione dinamica fra due oscillatori poggiati su suolo elastico*, Rendiconti dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere, 104 e Atti del Gruppo di ricerca per le azioni sismiche e del vento sulle costruzioni del C.N.R., Roma, 123-184.

Barkan D.D., 1962, *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill Book, New York.

Boussinesq J., 1885, *Application des potentiels a l'étude de l'équilibre e de mouvement des solides élastique*, Paris, Gauthier-Villars.

Burghignoli A., 1983, *Identificazione, valutazione e influenza dei fattori geotecnici nei problemi di amplificazione locale*, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica, Spoleto, Italia, Vol. 3, 89-98.

Crespellani T., 1986, *Indagini geotecniche per la caratterizzazione dei terreni in zona sismica*, in *Elementi per una guida alle indagini di Microzonazione Sismica*, a cura di E. Faccioli, Progetto Finalizzato Geodinamica, Monografie Finali, C.N.R., Vol. 7, Cap. 4.

Crespellani T., Nardi R., Simoncini C., 1988, *La liquefazione dei terreni in condizioni sismiche*, Zanichelli Ed.

Croce A., Vinale F., 1980, *Liquefazione di depositi sabbiosi saturi*, ANCE.

D'Elia B., 1983, *La stabilità dei pendii naturali in condizioni sismiche*, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica, Spoleto, Italia, Vol. 3, 125-135.

Dente G., 1983, *La risposta dinamica dello strato eterogeneo attraversato da onde di taglio*, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica, Spoleto, Italia, Vol. 3, 153-162.

Faccioli E., 1979, *Engineering seismic risk analysis of the Friuli region*, Bollettino di Geofisica e Teoria Applicata, Vol. 21, 173-190.

Faccioli E., 1981a, *Liquefazione dei terreni granulari saturi per effetto di sollecitazioni sismiche*, in *Costruzioni in zona sismica*, a cura di A. Castellani, Masson, 91-115.

Faccioli E., 1981b, *Proprietà dinamiche dei terreni*, in *Costruzioni in zona sismica*, a cura di A. Castellani, Masson, 55-90.

Faccioli E., 1986, *Elementi per una guida alle indagini di Microzonazione Sismica* (a cura di), Progetto Finalizzato Geodinamica, Monografie Finali, C.N.R.

Ghionna V.N., 1989, *Opere di sostegno in zona sismica*, Atti del XIV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino: *Comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico*, Vol. 14.13.

Ishihara K., 1996, *Soil behaviour in Earthquake Geotechnics*, Clarendon Press, Oxford.

Ishihara K., Li S., 1972, *Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test*, Soils and Foundations, 12 (2), 19-39.

Ishihara K., Tatsuoka F., Yasuda S., 1975, *Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stresses*, Soils and Foundation, 15 (1), 29-44.

Ishihara K., Yasuda S., 1972, *Sand Liquefaction Due to Irregular Excitation*, Soils and Foundations, 12 (4), 65-77.

Ishihara K., Yasuda S., 1973, *Sand Liquefaction under Random Earthquake Loading Condition*, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Session 1 D, 38.

Ishihara K., Yasuda S., 1975, *Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation*, Soils and Foundations, 15 (1), 45-59.

- Lamb H., 1904, *On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid*, Philos. Trans R.S., London, Ser. A, vol. 203, 1-42.
- Love A.E.H., 1911, *Some problems of geodynamics*, University Press, Cambridge.
- Maugeri M., 1983, *Indagine geotecnica per la valutazione delle proprietà dinamiche di un terreno argilloso*, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica. Spoleto, Italia, Vol. 3, 147-152.
- Ministero Infrastrutture, 14.01.2008, *Norme tecniche per le costruzioni*.
- Nova R., 1983, *L'interpretazione meccanica del comportamento dei terreni sottoposti a carico ciclico*, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica. Spoleto, Italia, Vol. 3, 99-107.
- O'Reilly M.P., Brown S.F., 1991, *Cyclic Loading of Soils: from theory to design*, Blackie Ed. (Glasgow and London), Van Nostran Reinhold (New York).
- Pasqualini E., 1989, *La liquefazione dei terreni non coesivi*, Atti del XIV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino *Comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico*, Vol. 14.06.
- Rayleigh L., 1985, *On waves propagated along the plane surface of an elastic solid*, Proceedings of Mathematical Society of London, Vol. 17, 4-11.
- Richart F.E., 1962, *Foundation Vibrations*, ASCE Transactions, Vol.127, Part I, 863-898.
- Richart F.E., Hall J.R., Woods R.D., 1970, *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Seed H.B., 1960, *Soil Strength during Earthquakes*, Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering., Vol. 1, 183-194.
- Seed H.B., Chan C.K., 1966, *Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions*, Journal Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 94 (SM2), 53-78.
- Seed H.B., Fead J.W.N., 1959, *Apparatus for Repeated Load Tests on Soils*, Special Technical Publication, 204, ASTM, Philadelphia.
- Seed H.B., Lundgreen R., 1954, *Investigation of the Effect of Transient Loading on the Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sands*, Proceedings of ASTM, Vol. 54, 1288-1306.
- Silvestri F., Viggiani C., Vinale F., 1989, *Analisi del comportamento dei terreni da prove cicliche e dinamiche di laboratorio*, Atti delle conferenze di Geotecnica di Torino, XIV ciclo *Comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico*, Torino.
- Tatsuoka F., Ishihara K., 1974, *Drained deformation of sands under cyclic stresses reversing direction*, Soils and Foundation, 14 (3), 51-65.
- Vannucchi G., Ghinelli A., 1983, *Metodo di calcolo numerico per pali soggetti ad azioni orizzontali cicliche: terreno coerente saturo*. Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica. Spoleto, Italia, Vol. 1, 207-214.
- Vinale F., 1978, *Validità delle correlazioni empiriche per la valutazione della velocità delle onde di taglio*. Atti del XIII Convegno Italiano di Geotecnica, Merano.
- Woods R.D., 1968, *Screening of Surface Waves in Soils*. Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 94 (SM4), 951-979.