

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

**FACULTATEA URBANISM ȘI ARHITECTURĂ  
DEPARTAMENTUL INGINERIA INFRASTRUCTURII  
TRANSPORTURILOR**

**Dr. ing. Eugeniu BRAGUȚA**

**ANALIZA COMPACTĂRII DINAMICE  
PRIN VIBRARE A STRUCTURILOR RUTIERE  
DIN PĂMÂNT STABILIZAT CU LIANȚI ECOLOGICI**

**Chișinău  
Editura „Tehnica-UTM”  
2021**

**CZU 625.731.2.06**

**B 76**

Monografia poate fi utilizată în procesul de instruire a studenților, masteranzilor, doctoranzilor, cât și inginerilor, proiectanților de construcții rutiere. În cadrul monografiei sunt prezentate informații cu privire la complexul lucrărilor de compactare dinamică prin vibrație a pământurilor stabilizate cu lianți ecologici. Utilizarea tehnologiilor moderne, folosind lianții ecologici la stabilizarea straturilor de umplutură controlate și realizarea sistemelor rutiere reprezintă o aplicare mai restrânsă comparativ cu celelalte tipuri de agenți stabilizatori, motiv pentru care experiența practică în stabilizare cu astfel de produse este limitată.

Autor: lector univ., dr. Eugeniu BRAGUȚA

Redactor responsabil: lector univ., dr. Eugeniu BRAGUȚA

Recenzent: conf. univ., dr. Cornelia DOBRESCU

**DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM**

**Braguța, Eugeniu.**

Analiza compactării dinamice prin vibrație a structurilor rutiere din pământ stabilizat cu lianți ecologici / Eugeniu Braguța; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Urbanism și Arhitectură, Departamentul Ingineria Infrastructurii Transporturilor. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2021. – 192 p.: fig., tab.

Referințe bibliogr.: p. 175-189. – 50 ex.

ISBN 978-9975-45-687-6.

625.731.2.06

B 76

Redactor Eugenia Balan

---

Bun de tipar 01.04.21

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hârtie ofset. Tipar RISO

Comanda nr. 25

---

2004, UTM, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168  
Editura "Tehnica-UTM"

2045, Chișinău, str. Studenților 9/9

**ISBN 978-9975-45-687-6**

**© UTM, 2021**

**© Eugeniu Braguța**

## CUVÂNT ÎNAINTE

Cu deosebit respect aduc mulțumiri conducătorului științific al tezei de doctorat domnului prof.univ., dr. ing. Polidor-Paul BRATU pentru sprijinul susținut și ajutorul competent acordat pe toată perioada de pregătire a doctoratului și de elaborare a tezei.

Aduc respectuoase mulțumiri Comisiei de îndrumare a Școlii doctorale și cadrelor didactice de la Facultatea Inginerie și Agronomie din Brăila, domnului conf. univ., dr. hab., ing. Silviu NĂSTAC, conf. univ., dr. hab., ing. Carmen DEBELEAC și domnului dr., ing. Adrian LEOPA. Îmi exprim toată recunoștința față de domniile lor fără ajutorul cărora nu ași fi reușit.

Mulțumesc cercetătorilor specialiști din cadrul Institutului de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții ICECON S.A. București pentru profesionalismul și competența cu care m-au ajutat și m-au sprijinit în realizarea determinărilor experimentale și în mod special echipei de cercetători: dr. ing. Ramona PINȚOI, ing. Carmen ALEXANDRU sub coordonarea dlui dir. Aurelian GHINEA.

Mulțumesc în mod special doamnei dr. ing. Cornelia-Florentina DOBRESU pentru profesionalismul și competența cu care m-a ajutat și m-a sprijinit în realizarea determinărilor experimentale.

Țin să aduc mulțumiri domnului decan FUA, dr. ing. Sergiu BEJAN, pentru sprijinul acordat, domnului șef DIIT, dr. ing. Ruslan BORDOS.

În încheiere doresc să-mi exprim recunoștința față de familia mea pentru încurajare și susținere.

Dr. ing. Eugeniu BRAGUȚA

## CUPRINS

Cuvânt înainte .....	3
Prefață .....	8
Notații și abrevieri .....	13
Listă figuri. Listă tabele .....	17
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR.....	21
1.1. Introducere.....	21
1.2. Noțiuni generale privind compactarea dinamică .....	22
1.3. Modelarea reologică în procesul de compactare mecanică a pământurilor .....	27
1.4. Stadiul actual în domeniul compactării prin vibrații .....	33
1.5. Modelarea pământurilor necoezive încărcate dinamic vertical .....	42
1.6. Oportunitatea și obiectivele monografiei .....	49
2. CERINȚELE PARAMETRICE ALE TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE A PĂMÂNTURILOR STABILIZATE .....	51
2.1. Generalități .....	51
2.2. Compactoare autopropulsate cu un singur rulou vibrator ....	56
2.3. Compactoare cu două ruloare vibratoare .....	61
2.4. Caracteristici dinamice privind compactoarele vibratoare ...	68
2.5. Capabilitatea tehnologică .....	86
3. ANALIZA DINAMICĂ A INTERACȚIUNII RULOUI VIBRATOR–TEREN PENTRU PĂMÂNTURI .....	88
3.1. Generalități .....	88

3.2. Metode de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrare.....	90
3.2.1. Modelul Voigt-Kelvin (E/V).....	91
3.2.1.1. Răspunsul sistemului E/V la excitația dinamică inerțială armonică .....	92
3.2.2. Modelul Maxwell (E-V).....	94
3.2.2.1. Răspunsul sistemului E-V la excitația dinamică inerțială armonică .....	95
3.2.3. Modelul Zener E/(E-V) și răspunsul sistemului E/(E-V) la excitația dinamică inerțială armonică .....	96
3.2.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke E - (E/V) și răspunsul sistemului E-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică .....	98
3.2.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton V - (E/V) și răspunsul sistemului V-(E/V) la excitația dinamică inerțială armonică .....	101
3.2.6. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton (E-V) - (E/V) și răspunsul sistemului (E-V) - (E/V) la excitația dinamică inerțială armonică.....	103
3.3. Mișcarea vibratorie a ansamblului vibrator-teren .....	105
3.3.1. Vibrațiile de translație verticală, răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastic.....	107
3.3.2. Răspunsul dinamic pentru modelul elastic.....	111
3.3.3. Răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastoplastic. .	114
3.3.4. Răspunsul dinamic pentru modelul elastoplastic E-P... .	116

3.3.5. Răspunsul dinamic pentru sistemul cu o masă.....	116
3.4. Vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale.....	122
3.4.1. Modelul dinamic al sistemului compactor vibrator–teren .....	122
3.4.2. Pulsațiile proprii ale ansamblului compactor vibrator–teren .....	124
4. ANALIZA PARAMETRILOR DE CONTACT RULOU COMPACTOR–PĂMÂNT .....	133
4.1. Modulul static de deformare liniară a pământului.....	133
4.2. Lățimea amprenteii de contact dintre rulou și teren în dependență de densitatea în stare uscată a pământului.....	135
4.3. Grosimea optimă a stratului de pământ compactat.....	136
4.4. Tasarea stratului de pământ .....	137
4.5. Modulul static de deformație liniară în funcție de tasarea terenului.....	141
4.6. Coeficientul de rigiditate în funcție de tasarea terenului....	143
4.7. Forța de rezistență a terenului în funcție de tasarea acestuia .....	146
4.8. Efortul unitar (tensiuni) axial de compactare în funcție de tasarea terenului.....	147
4.9. Parametrii esențiali implicați în procesul de interacțiune vibrator–teren .....	149

5. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE PENTRU VALIDAREA TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE DINAMICĂ .....	152
5.1. Generalități .....	152
5.2. Cercetări experimentale parametrice privind pământurile stabilizate cu enzime .....	152
5.2.1. Rigiditatea structurii de pământ stabilizat procesat.....	152
5.2.2. Modulul de elasticitate longitudinală.....	155
5.2.3. Coeficientul lui Poisson .....	155
5.2.4. Modulul de elasticitate volumică .....	156
5.2.5. Indicele Californian CBR.....	158
5.3. Determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat .....	158
5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale.....	167
5.5. Concluzii.....	167
6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII GENERALE DE CERCETARE .....	169
6.1. Concluzii.....	169
6.2. Contribuții personale .....	172
6.3. Direcții generale de cercetare .....	173
BIBLIOGRAFIE.....	175
ANEXA A.....	190

## PREFAȚĂ

În general, pământul, fie ca material de fundare a unei construcții, fie ca material propriu-zis de construcție, nu are formă ideală din punctul de vedere al inginerului în domeniu. Este cunoscut că această problemă e depășită prin diverse procedee specifice de îmbunătățire a calității pământului, una dintre cele mai importante și frecvente acțiuni asupra pământurilor fiind densificarea realizată prin compactare. Adesea, utilizată pentru densificarea pământului, compactarea dinamică este de mult aplicată în cazul diferitelor tipuri de pământuri, dar lucrarea respectivă se ocupă de compactarea dinamică prin vibrare a structurilor rutiere din pământ stabilizat cu lianți ecologici. Compactarea de suprafață a pământurilor necoezive se poate efectua foarte eficient cu ajutorul cilindrilor vibratorii, aceștia fiind utilaje de compactare cu cilindri netezi dotați cu mecanism vibrator.

Metoda prin care se specifică și se controlează gradul de compactare depinde de natura elementului compactat și este foarte importantă la obținerea proprietăților dorite pentru materialul utilizat, în special, dacă se urmărește un rezultat relativ uniform al procesului de compactare. Un nivel ridicat al calității necesită și un control corespunzător asupra întregii suprafețe compactate, acest lucru putând fi obținut în mod economic printr-un sistem integrat de control continuu al compactării.

Astfel, unul dintre factorii care afectează în mod semnificativ proprietățile unui pământ și în consecință procesul de compactare al pământului, este conținutul de apă care deseori este considerabil în afara posibilităților de influență a constructorului. Întrucât conținutul de apă variază inevitabil fie datorită schimbărilor atmosferice, fie din punct de vedere al întinderii suprafeței asupra căreia se lucrează, important este a fi stabilite implicațiile acestui fenomen asupra metodei de control al rezultatului compactării.

Această monografie are drept scop determinarea instrumentală și informatică a legăturilor structurale și funcționale care conduc interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul



compactat, având ca scop formularea unui set de modele aplicative care să permită și să asigure interfața utilaj–proces tehnologic cu monitorizarea și controlul parametrilor funcționali și cu menținerea acestora în zona de lucru optim.

Luând în considerare necesitatea și oportunitatea lucrării, pe tot parcursul cercetărilor au fost urmărite următoarele obiective principale:

- evaluarea multicriterială a actualului nivel de cercetare în domeniu pe baza examinării critice a realizărilor relevante atât pe plan național, cât și pe plan internațional;
- cercetarea comparativă a comportării în regim static, dar în special în regim dinamic, a modelelor reologice cu scopul de a identifica și a evidenția elementele de specificitate privind capacitatea acestora de a simula intimitatea (profunzimea) fenomenologică a interacțiunii organ de lucru–material procesat;
- determinarea setului de elemente reologice care să constituie baza teoretică pentru dezvoltarea și fundamentarea modelelor finale, cu rol aplicativ, luând în considerare caracteristicile elastice și disipative ale mediilor analizate și comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat;
- crearea unui set de teste instrumentale *in situ* suplimentate de o gamă de încercări experimentale de laborator efectuate pe baza unui plan sistemic de analiză multicorelativă, care să garanteze baza de date pentru procesul de armonizare comportamentală și cu atribuirea parametrică a modelelor matematice/numerice cu realitatea identificabilă și măsurabilă;
- îmbinarea la nivel teoretic a setului de modele de interfață prin crearea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu verificare cu scopul optimizării următorilor parametri esențiali: complexitatea structurală *versus* fidelitatea simulării, nivelul de detaliere *versus* disponibilitatea de rezolvare;

- determinarea configurației finale, conferirea caracteristicilor de lucru și confirmarea setului de modele de interfață cu evaluarea nivelului de performanță obținut.

Monografia este structurată în 6 capitole desfășurate pe 192 pagini, conținând 55 figuri, 20 tabele și 136 referințe bibliografice.

În cele ce urmează se va prezenta o scurtă descriere a conținutului capitolelor acestei monografii.

Capitolul 1 cuprinde actualul stadiu al cercetărilor privind nivelul cunoașterii și a recentelor studii în domeniul compactării straturilor rutiere (formate din pământ stabilizat, mixtură asfaltică). La fel, sunt prezentate noțiunile generale privind compactarea dinamică, modelarea reologică.

În capitolul 2 sunt inserate cerințele parametrice constructive, funcționale și tehnologice ale organelor de lucru ale compactoarelor, ținând cont și punând accent pe cele care folosesc vibrațiile în procesul tehnologic de compactare a pământurilor stabilizate. La fel, este argumentată pe considerente teoretice și practice importanța corelației dintre soluția tehnologică, natura terenului și echipamentul de compactare folosit, astfel încât să se ajungă la un anumit nivel de performanță impus la executarea lucrărilor specifice de structuri rutiere.

Capitolul 3 cuprinde o gamă variată de modele dinamice utilizate la simularea compactoarelor vibratoare, fiind prezentate în ordinea complexității constitutive ale acestora. Analiza dinamică a interacțiunii rului vibrator–teren pentru pământuri, precum și metodele de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrație, răspunsul sistemului E-V la excitații dinamice inerțiale armonice, mișcarea vibratorie a ansamblului vibrator–teren, vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale. Pentru aceste modele dinamice s-au elaborat ecuațiile diferențiale de mișcare, arătând deplasările instantanee ale maselor sau punctelor de interes ale compactorului (modelat ca un rigid). S-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de forța de rezistență, de coeficientul de

rigiditate, la fel, și de efortul unitar (tensiuni) axial de compactare a terenului. La final, pe baza acestor legități, s-a constatat dependența globală a tuturor parametrilor expuși anterior care au implicare directă în procesul de interacțiune compactor–teren.

În capitolul 4 sunt analizate și deduse legitățile funcționale dintre parametrii caracteristici ai pământurilor stabilite pe baza determinărilor experimentale. S-a stabilit în primul rând dependența densității pământului în stare uscată în funcție de modulul static de deformare liniară, de grosimea optimă, de lățimea amprenteii de contact dintre rulou și teren, la fel, și de tasarea stratului din componența sistemului rutier. De asemenea, s-a stabilit dependența tasării terenului de modulul static de deformare liniară, de coeficientul de rigiditate, de forța de rezistență, precum și de efortul unitar axial de compactare a terenului.

În capitolul 5 este descrisă metodologia și planul de realizare a testelor experimentale pentru validarea tehnologiei în cazul compactării pământurilor stabilizate, indicându-se metodele de experimentare folosite, precum și aparatura specifică de monitorizare a parametrilor esențiali ai procesului de compactare. Au fost efectuate teste experimentale pe terenuri de umplură în cadrul Poligonului de încercări. Astfel, prin aceste teste s-au determinat parametrii fizico-mecanici ai terenului (umiditate, grad de compactare, densitate, tasare plastică, modulul de elasticitate longitudinală, coeficientul lui Poisson, modulul de elasticitate volumică, indicele californian CBR, determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat) după treceri succesive, la fel și spectrul în frecvență al vibrațiilor în timpul desfășurării procesului tehnologic de compactare. Evaluarea acestor parametri este necesară, deoarece o parte dintre ei reprezintă mărimi de intrare în modelul dinamic al interacțiunii compactor–teren propus în această lucrare.

Capitolul 6 cuprinde concluzii finale, contribuții personale în domeniul dat și direcțiile viitoare de cercetare.

Autorul este recunoscător oricărei opinii ce vizează o îmbunătățire a lucrării într-o eventuală ediție viitoare.

## NOTAȚII ȘI ABREVIERI

$a$	acelerația
$a_{cr}$	latura mică a suprafeței cramponului ruloului
$A$	amplitudinea vibrației
$A_c$	aria de contact dintre pneu/rulou și teren
$A_{cr}$	aria de contact dintre un crampon și materialul compactat
$b^*$	lățimea amprenteii ruloului la contactul cu pământul
$B$	lungimea ruloului
$c$	coeficientul de amortizare
$c_v$	coeficientul de aproximare a tranziției
$[C]$	matricea de amortizare vâscoasă
$C_z$	coeficientul de contracție elastică uniformă
$C_t$	consolidarea (deformația plastică)
$D$	operator $d/d_t$
$D_c$	gradul de compactare a pământului
$e_0$	indicele porilor în stare inițială a terenului
$E$	energia cinetică
$E_0$	modulul de deformație totală determinat pe teren
$E_{lab}$	modulul de deformație totală determinat în laborator, în endometru
$E_{st}$	modulul static de deformare a pământului
$E_d$	modulul dinamic de deformare a pământului
$f$	frecvența de excitație
$f_0$	frecvența de rezonanță
$f(t)$	funcția de fluaj
$f_v$	coeficientul de frecare vâscoasă
$F$	forța
$F_C$	forța de frecare de tip Coulombian
$F_e$	forța elastică
$F_p$	forța plastică
$F_{fr}$	forța de frecare specifică componenteii plastice a materialului
$F_{brk}$	forța de frecare a lui Stribeck
$F_{frec}$	forța de frecare statică

$F_{st}$	componenta statică a unei forțe
$F_{din}$	componenta dinamică a unei forțe
$F_{ex}$	forța excitatoare
$\{F(t)\}$	vectorul excitațiilor
$F_0$	amplitudinea forței perturbatoare (excitatoare)
$g$	acelerația gravitațională
$G$	greutatea
$h$	coeficientul de vâscozitate
$h_C$	grosimea stratului de pământ compactat la o trecere
$h_{Ci}$	grosimea inițială a stratului de pământ
$H_{cr}$	înălțimea activă a cramponului
$H_0$	adâncimea zonei active de compactare
$i_c$	indicele de compresibilitate
$J$	momentul de inerție masic
$k$	coeficientul de rigiditate
$k_a$	coeficientul de afânare a terenului
$k_d$	coeficientul dinamic de amplificare
$[K]$	matricea de rigiditate
$l$	lungimea
$L_e$	gradul de elasticitate
$L_p$	gradul de plasticitate
$m$	masa
$m_r$	masa ruloului compactor
$m_0$	masa pieselor excentrice din componența sistemului de generare a vibrațiilor
$m_{0r}$	momentul static al maselor pieselor excentrice
$m_{ij}$	mase reduse
$M_\omega$	momentul cuplului de acționare a axului vibratorului în regim stabilizat
$[M]$	matricea masei
$n_{cr}$	numărul cramponelor de pe un singur șir
$n_{crt}$	numărul total de cramioane al ruloului
$N$	forța de strângere
$p$	presiunea din pneu

$p_1, p_2$	pulsații proprii
$P$	forța de comprimare
$P_c$	pragul de curgere
$r$	excentricitatea
$r(t)$	funcția de relaxare a terenului
$R$	raza ruloului compactorului
$S$	suprafața
$t$	timpul
$\{u\}$	vectorul deplasărilor
$\{\dot{u}\}$	vectorul vitezelor
$\{\ddot{u}\}$	vectorul accelerațiilor
$v$	viteza liniară
$V$	energia potențială a sistemului elastic
$V_0$	volumul după compactare
$V_f$	volumul înaintea compactării
$q$	încărcarea specifică liniară a ruloului
$q_i$	coordonata generalizată $i$
$Q$	greutatea ruloului compactorului
$Q_i$	forța generalizată $i$
$x_s$	deplasarea pe verticală a pământului
$x_z$	coeficientul de formă
$x$	deplasarea pe direcție verticală
$z$	deformarea
$w$	umiditatea efectivă a pământului
$w_0$	umiditatea optimă a pământului
$\xi$	coeficientul de rigiditate al pneului compactorului
$\mu$	coeficientul de frecare
$\eta$	factorul de amortizare
$\varphi$	defazajul excitației armonice
$\varphi_i$	deplasarea unghiulară în raport cu axa $i$
$\nu$	coeficientul lui Poisson
$\delta_i$	deformația terenului în regimul elasto-plastic pentru ciclul complet de lucru $i$ al funcției excitatoare

$\rho_d$	densitatea materialului în stare uscată
$\rho_{d\ max}$	densitatea maximă în stare uscată a pământului
$\rho_{di}$	densitatea inițială în stare uscată a pământului
$\rho_w$	densitatea în stare umedă a pământului
$\Delta l$	deformația elastică
$\Delta l(\dot{z})$	viteza de deformare elastică
$\Delta h$	tasarea pământului
$\sigma_i$	efortul unitar pe direcția $i$
$\sigma_r$	rezistența la rupere
$\sigma_{max}$	efortul unitar maxim
$\omega$	pulsația forței de excitație
$\varepsilon$	deformația
$\lambda_p$	tasarea specifică
$\Gamma$	raportul dintre accelerația vibrației și accelerația gravitațională



## LISTĂ FIGURI

1. Fig. 1.1. Compoziția solului
2. Fig. 1.2. Compactarea dinamică a unui material granular:  
(a) presiune verticală ciclică, (b) accelerații verticale ciclice
3. Fig. 1.3. Variația porozității unui nisip uscat pe parcursul testelor de compresiune cu accelerație ciclică verticală
4. Fig. 1.4. Influența perioadei de vibrație în cazul compactării dinamice: (a) nisipuri uscate; (b) nisipuri umede
5. Fig. 1.5. Curba de variație a densității aparente în stare uscată în funcție de umiditate
6. Fig. 1.6. Curbe de compactare obținute în acest mod: 1, 2 - în laborator prin compactare statică (cu forță variabilă sau constantă); 3 - în teren cu compactare cu tren de pneuri după 6 treceri; 4 - în teren prin compactare cu rulou cu crampoane după 6 treceri; S - curba de saturație
7. Fig. 1.7. Zonarea solului în funcție de conținutul de apă
8. Fig. 1.8. Variația efortului de forfecare în funcție de conținutul de apă din sol
9. Fig. 1.9. Curbele de compactare pentru diferite tipuri de teren în dependență de umiditate
10. Fig. 1.10. Propagarea în direcții radiale a undelor elastice prin sol
11. Fig. 1.11. Mișcarea pe direcție orizontală și verticală a particulelor în funcție de adâncime
12. Fig. 1.12. Curbe de compactare a solului compactat cu și fără efect dinamic
13. Fig. 1.13. Modelul conului semiinfinit elastic
14. Fig. 1.14. Deformația elasto-plastică a solului necoeziv sub impactul cilindrului
15. Fig. 1.15. Relația forță-deplasare în cazul comportărilor plastice ideale (a) și elastice ideale (b)
16. Fig. 1.16. Stabilirea punctuală a deformațiilor plastice și elastice ale solului

17. Fig. 1.17. Relația tensiune tăietoare–deformație specifică pentru solicitarea dinamică

18. Fig. 1.18. Definierea modulului de rezistență la tăiere și a raportului de vâscozitate

19. Fig. 1.19. Variația modulului de rezistență și a raportului de vâscozitate cu deformație specifică

20. Fig. 2.1. Exemple de utilaje care realizează compactarea prin acțiune statică asupra terenului

21. Fig. 2.2. Utilaje de compactare autopropulsate cu un singur rulou vibrator: rulou vibrator neted; rulou vibrator profilat

22. Fig. 2.3. Utilaje de compactare cu două ruloouri vibratoare: a) modelul Catterpillar; b) modelul Bomag; c) modelul Ammann; d) modelul Hamm

23. Fig. 2.4. Oscilațiile produse de vibrogeneratoarele concepute de firma Hamm

24. Fig. 2.5. Influența oscilațiilor asupra efectului de compactare

25. Fig. 2.6. Acționarea vibratorului fără reglarea frecvenței vibrațiilor

26. Fig. 2.7. Acționarea vibratorului cu reglarea frecvenței vibrațiilor și a nivelului forței perturbatoare

27. Fig. 2.8. Regimul vibrațiilor tehnologice

28. Fig. 2.9. Variația porozității în funcție de raportul accelerațiilor corelat cu granulozitatea pământului – a, b, c

29. Fig. 2.10. Distribuția pe adâncime a efortului de compresiune sub pneurile compactatorului

30. Fig. 3.1. Modelul Voigt-Kelvin

31. Fig. 3.2. Modelul Maxwell

32. Fig. 3.3. Modelul Zener

33. Fig. 3.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke

34. Fig. 3.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton

35. Fig. 3.6. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton

36. Fig. 3.7. Modelul mecanic al ansamblului vibrator–teren cu două mase de vibrare: a) modelul dinamic; b) schema de forțe în regim de echilibru dinamic instantaneu

37. Fig. 3.8. Modelul mecanic idealizat al ansamblului vibrator–teren cu două mase în vibrare

38. Fig. 3.9. Model mecanic idealizat al ansamblului vibrator–teren cu o masă de vibrare

39. Fig. 3.10. Modelul dinamic al ansamblului vibrator–teren cu o singură masă de vibrare, cu pământul modelat  $V/(E-P)$

40. Fig. 3.11. Model dinamic al ansamblului vibrogenerator–pământ cu o singură masă în vibrare unde pământul este modelat E-P: a) reprezentare simbolică; b) curba caracteristică de deformare liniară a pământului

41. Fig. 3.12. Compactorul vibrator este în contact permanent cu pământul modelat mecanic de un număr mare de „arcuri elicoidale”

42. Fig. 3.13. Schema forțelor și momentelor de legătură

43. Fig. 3.14. Reprezentarea grafică a pulsațiilor proprii similar „cercului Mohr”

44. Fig. 4.1. Dependența modulului static de deformare liniară în funcție de densitatea în stare uscată, și anume; 1 - pentru nisip, pământuri necoezive; 2 - pentru pământuri slab coezive; 3 - balast

45. Fig. 4.2. Dependența densității în stare uscată în funcție de tasarea pământului

46. Fig. 4.3. Dependența gradului de compactare în funcție de tasare pentru un pământ slab coeziv

47. Fig. 4.4. Dependența modulului static de deformare în funcție de tasare pentru un model de pământ slab coeziv

48. Fig. 4.5. Dependența coeficientului de rigiditate în funcție de tasare (pentru un pământ slab coeziv)

49. Fig. 4.6. Dependența forței elastice de rezistență la compactare în funcție de tasare (model de pământ slab coeziv)

50. Fig. 4.7. Dependența efortului unitar axial de compactare cu tasare pentru un model de pământ slab coeziv

51. Fig.4.8. Dependența globală a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor–teren în funcție de tasare pentru un model de pământ slab coeziv

52. Fig.5.1. Variația modulului de elasticitate volumică în raport cu timpul

53. Fig. 5.2. Reprezentarea probelor examinate

54. Fig. 5.3. Reprezentarea grafică a creșterii rezistenței la compresiune după îngheț–dezgheț

55. Fig. 5.4. Încercarea unei probe cu Proctor modificat

## STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

### 1.1. Introducere

Conform lucrărilor de terasament ale structurilor rutiere din pământ stabilizat și teren natural utilizat pentru umplutură, pot fi definiți următorii factori: porozitate, umiditate, compactitate. La anumite valori ale factorilor care redau starea pământurilor se constată o anumită comportare a terenului la acțiunea unor forțe exterioare aplicate prin mijloace mecanice static sau dinamic.

În componența sa pământul are particule solide minerale concepute prin degradarea chimică sau fizică a rocilor care pot conține materii organice sau nu. Așadar, pot fi menționate următoarele trei faze:

- faza solidă alcătuită din scheletul mineral;
- faza lichidă (în apă) care umple total sau parțial golurile dintre granule;
- faza gazoasă (aer) care umple golurile neocupate de faza lichidă [14]\*\*\*.

Este posibil în unele cazuri ca una dintre ultimele două faze să lipsească. Când lipsește faza lichidă, pământul se consideră uscat, iar când golurile dintre granule sunt umplute cu apă, pământul se consideră saturat. În dependență de proporția celor trei faze (solidă, lichidă și gazoasă) în compoziția unui pământ, de mărimea granulelor, de modul de asociere a elementelor componente, rezultă diverse tipuri de pământuri, precum și caracteristicile fizico-mecanice ale acestora [14]\*\*\*.

Prin urmare, pământul în stare naturală sau afânată are o rezistență redusă, având deformații mari sub acțiunea sarcinilor. Așadar, se recomandă ca după efectuarea lucrărilor de săpare și transport, unde este poziționată construcția, să se execute lucrări de compactare.

Termenul *compactare* consta într-un proces tehnologic prin care greutatea specifică a terenului este mărită prin constrângerea granulelor să se reorganizeze într-o stare mai densă. În procesul compactării aerul conținut în sol este expulzat în general prin procedee mecanice. La fel, apa care se află în sol poate fi expulzată, anume în cazul materialelor granulare permeabile, prin procesul de compactare fiind redusă porozitatea. În acest mod, prin reducerea porilor unui material de umplură probabilitatea modificării semnificative a conținutului de apă se reduce, iar tasările ulterioare pot fi neglijabile.

Prin urmare, la finalul procesului de compactare obținem o reducere a volumului de goluri dintre particulele solide, o creștere a caracteristicilor mecanice prin modulul de deformare și rezistența la compresiune cu minimizarea permeabilității apei în stratul compactat. Din acest punct de vedere, pentru a obține un anumit grad de compactare necesar, sunt importante lățimea și adâncimea stratului compactat, viteza de parcurgere, precum și numărul de treceri.

Procedeele de îmbunătățire a terenurilor de fundare problematice sunt utilizate pe larg în întreaga lume, având un progres continuu prin utilizarea inovării și dezvoltării noilor tehnologii, fiind mai economice și care au un impact mai mare asupra protecției mediului prin reducerea emisiilor în atmosferă.

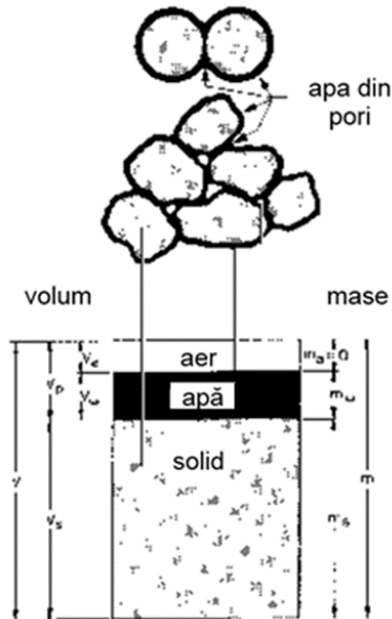
Altfel, stabilind parametrii optimi de compactare pentru echipamentele tehnologice, cât și a felului de aplicare a tehnologiei, în dependență de natura solului, trebuie să se realizeze încercări specifice care se pot efectua în laborator și/sau poligoane experimentale *in situ*.

## **1.2. Noțiuni generale privind compactarea dinamică**

Termenul *compactare* se consideră în dependență de proporția volumelor sau maselor dintre conținutul de aer, conținutul de apă și partea solidă a solului. Deci, gradul de compactare este controlat prin densitatea solului în stare uscată, ceea ce arată masa părții

solide din unitatea de volum a materialului compactat. În figura 1.1 sunt reprezentate, sub forma unei diagrame, fazele solidă, lichidă și de aer ale unui material compactat.

În anexa A sunt date definițiile unor termeni considerați în fenomenul compactării, precum și relațiile de legătură dintre aceștia.



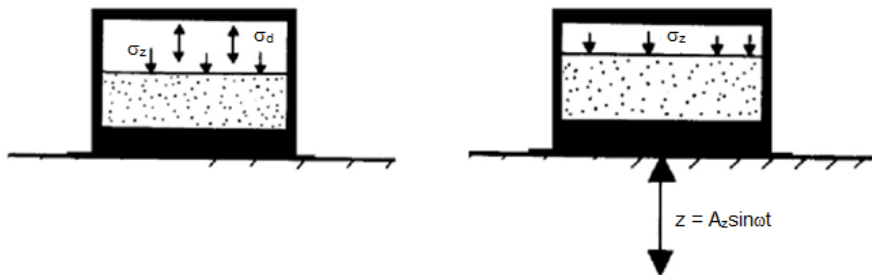
**Fig. 1.1. Compoziția solului**

Tehnologia reducerii tasărilor produse sub diverse structuri are la bază un proces de compactare produs de vibrații. Astfel, efectul tensiunii de suprafață la contactul dintre granulele unui material umed manifestă rezistența la alunecarea acestora în timpul procesului de reșezare într-o poziție mai densă. Luând în considerare acest lucru, materialele granulare uscate prezintă o compactare mai pronunțată sub acțiunea vibrațiilor decât materialele caracterizate prin coeziune aparentă [1].

Pentru a determina efectul unei încărcări dinamice asupra unui material granular sub presiune s-au efectuat diverse studii de laborator în două moduri: prin folosirea unei presiuni verticale ciclice controlate și prin folosirea unei accelerații verticale ciclice controlate reprezentate conform figurii 1.2 [2, 3, 33].

În primul caz, asupra materialului granular din incintă este aplicată o presiune verticală a aerului  $\sigma_z$ , după care este aplicată în câteva cicluri o presiune dinamică de amplitudine  $\sigma_d$ . În cazul doi, după aplicarea presiunii verticale  $\sigma_z$ , incinta este supusă pentru o anumită perioadă de timp unei vibrații verticale de ecuație  $z = A_z \sin \omega t$ . Magnitudinea vârfului accelerației este  $A_z \omega^2 = A_z (2\pi f)^2$ , fiind verificată prin intermediul amplitudinii deplasării și a frecvenței de vibrație.

Compresiunea verticală a probei este controlată la sfârșitul fiecărui test.



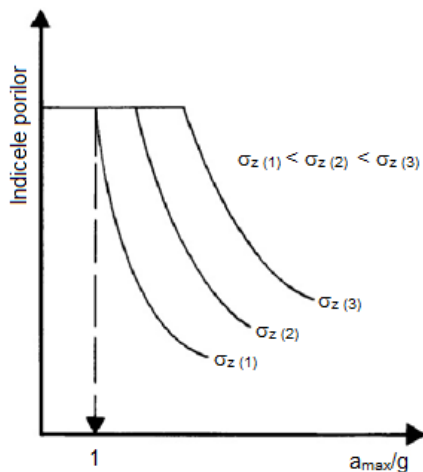
**Fig. 1.2. Compactarea dinamică a unui material granular [33]:**  
**(a) presiune verticală ciclică; (b) accelerații verticale ciclice.**

În figura 1.3 sunt descrise rezultatele unor teste de compresiune realizate prin intermediul unei accelerații ciclice verticale aplicate unui nisip uscat.

Testele au arătat că și în cazul unei presiuni înconjurătoare nule,  $\sigma_{z(1)} = 0$ , descreșterea porozității nu are loc înainte de atingerea unui vârf al accelerației egal cu accelerația gravitațională. În același timp, se observă că odată cu creșterea presiunii înconjurătoare,



magnitudinea vârfului accelerației la care porozitatea începe să descrească este din ce în ce mai mare [4].



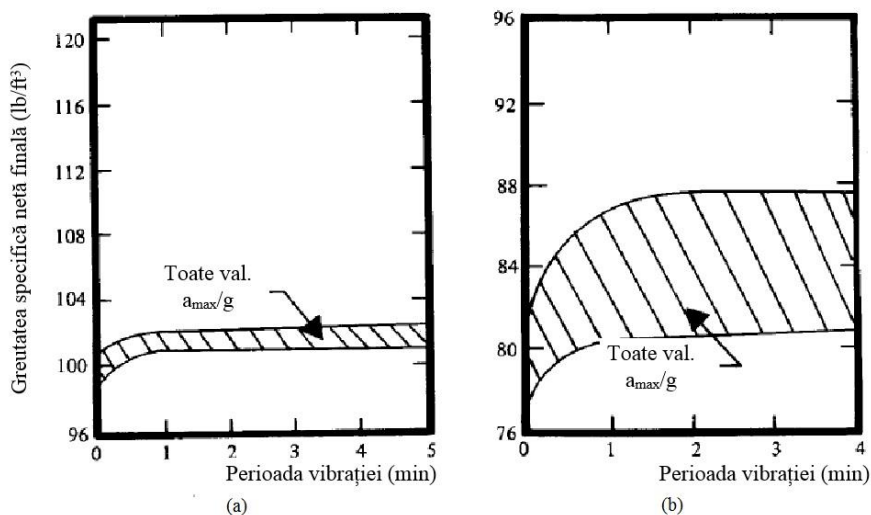
**Fig. 1.3. Variația porozității unui nisip uscat pe parcursul testelor de compresiune cu accelerație ciclică verticală**

În figura 1.4 este reprezentată variația greutateii specifice nete în raport cu perioada de vibrație atât pentru un nisip uscat, cât și pentru un nisip umed, ambele supuse unei accelerații ciclice verticale.

În urma studiilor efectuate, autorii au ajuns la următoarele concluzii principale: pentru vârfuli ale accelerației mai mici de  $1 \times g$  nu se obține o densificare semnificativă, iar creșterea conținutului de apă are o influență importantă, determinând o reducere a greutateii specifice finale nete [5].

Reieșind din figura 1.4, la fel se poate observa că, în comparație cu nisipurile uscate, nisipurile umede reprezintă o plajă mai largă de distribuție a greutateii specifice nete finale. Ceea ce înseamnă că în cazul compactării nisipurilor umede, pe lângă

magnitudinea accelerației ciclice, există și alți parametri cu o influență importantă asupra fenomenului dat.



**Fig. 1.4. Influența perioadei de vibrație în cazul compactării dinamice [33]: (a) nisipuri uscate; (b) nisipuri umede.**

În timpul vibrațiilor, granulele se vor reorganiza într-o stare mai densă sau mai relaxată. Cu toate acestea, datorită faptului că și un nivel relativ redus de coeziune între granule (produsă de capilaritate) poate reduce și chiar anula această reorganizare a granulelor, vibrația granulelor nu este considerată ca fiind importantă (cu excepția nisipurilor uscate sau complet saturate).

Impactul este caracterizat de faptul că utilajul compactor întrerupe contactul cu suprafața solului la fiecare ciclu al vibrației. Testele *in situ* au arătat că în mod curent astfel de situații apar în cazul acțiunii cilindrilor vibratorii asupra unui material deja compactat.

În ceea ce privește tensiunile în materialul compactat, este probabil ca acestea să fie micșorate datorită aplicării vibrațiilor în anumite condiții și în acest mod să determine o compactare mai

ușoară. Această situație se pare că are loc numai în cazul materialelor necoezive, deoarece cercetările *in situ* au arătat că materialele coezive devin în general mai tari în timpul aplicării unor încărcări dinamice.

Prin urmare, dezvoltarea deformațiilor specifice ciclice cauzată de oscilațiile cilindrului vibrator este considerată ca fiind cea care furnizează cea mai bună relație a compactării produse cu acest utilaj. Experimentele au demonstrat că acest mecanism este prezent în compactarea dinamică a tuturor mostrelor de materiale granulare atât coezive, cât și necoezive.

### **1.3. Modelarea reologică în procesul de compactare mecanică a pământurilor**

Modelarea și simularea comportării pământului sub acțiunea sarcinilor exterioare depinde după caz de cunoașterea tendințelor moderne de dezvoltare a reologiei completate de unele realizări actuale, cât și dificultățile care apar în stabilirea unor legi de guvernare mecanică a solurilor [46].

Astfel, stabilirea unor metode empirice de calcul al parametrilor care descriu comportarea în timp, sub acțiunile sarcinilor externe, a unui anumit tip de sol se face pe baza unor volume mari de încercări (de multe ori fără a putea include toate cazurile care pot apărea în practică), luând în considerare că prelucrarea informațiilor obținute prin încercări experimentale pot prezenta și incertitudini. Astfel, complexitatea și necunoașterea multor aspecte din comportarea mecanică a solurilor impun utilizarea unor modele reologice cu număr mare de grade de libertate și de cele mai multe ori rezolvarea ecuațiilor constitutive ale modelului denotă dificultăți destul de mari.

Astfel, o mare parte a specialiștilor care activează în domeniul mecanicii pământurilor și a fundațiilor construcțiilor s-au împărțit în două tabere: pe de o parte, teoreticienii care caută modele matematice din ce în ce mai riguroase pentru a simula comportarea pământurilor sub acțiunea sarcinilor exterioare, concentrându-se

mai ales asupra stabilirii sistemului de ecuații și a modului de rezolvare a acestuia, iar pe de altă parte cei care trebuie să determine în cazuri concrete starea de tensiuni și de deformații în masivele de pământ și să determine sistemul și geometria fundațiilor.

Aplicarea metodelor empirice sau a relațiilor teoretice simple neglijează realizările teoreticienilor, considerându-le inaplicabile în munca de proiectare și execuție curentă. În continuare vom prezenta succint atât unele realizări teoretice mai semnificative din ultima perioadă, cât și stadiul și dificultățile întâlnite în activitatea de experimentare.

Luând în considerare studiile teoretice de determinare a legilor de comportare mecanică a pământurilor, distingem următoarele modele reologice [46]:

#### ***a) Modele microreologice***

Pământurile, după cum se cunoaște, sunt medii disperse polifazice cu structură complexă, având capacitatea de rezistență și de deformare a legăturilor dintre particule mult mai redusă (de sute de ori) decât a granulelor componente, de aceea, mecanica pământurilor este în primul rând mecanica legăturilor caracterizată prin anizotropi și eterogenități accentuate. Aceste caracteristici arată cât de puțin se încadrează proprietățile pământurilor în ipotezele continuumului, ceea ce îndeamnă găsirea unor modele microreologice. Așadar, din cauza complexității structurii pământurilor și a puținelor realizări microstructurale, cercetarea microreologică are o utilizare extrem de redusă până acum la pământuri, chiar dacă proprietățile lor demonstrează posibilități mai mari de modelare mai riguroasă a comportării mecanice cu ajutorul interpretării statistice. E de menționat în acest context contribuția lui cu privire la aplicarea metodelor statistice la studiul curgerii nisipurilor numai sub acțiunea forțelor gravitaționale, neglijându-se aspectul dinamic. Autorul consideră mediul granular ca un ansamblu de elemente discrete, unde contactele se schimbă în timpul mișcării, considerând fenomenul apropiat de curgerea

turbulentă a unui fluid sau cu o mișcare browniană. Folosirea metodei microreologice este puțin cunoscută de specialiști, deși oferă mari posibilități, fiind cea mai apropiată de caracteristicile reale ale pământurilor. La fel, se consideră că este necesară o aprofundare mai intensificată a cercetărilor în direcția dată, în același timp fiind precizată și o tehnologie cât mai riguroasă a activității de experimentare [6].

### ***b) Modele fenomenologice***

Mulți dintre specialiști preferă folosirea diferitelor variante ale modelului continuumului la pământuri, fiindcă există o teorie matematică suficient de bine dezvoltată pentru unele probleme practice și rezultatele sunt acceptabile cu privire la stadiul actual al cunoașterii.

Astfel, prima categorie de modele și cele mai numeroase, numite de unii autori „tradiționale” [7, 8, 46], examinează pământurile ca materiale omogene, izotrope și monofazice. Proprietățile lor fizico-mecanice sunt definite prin parametri constanți care concretizează comportarea elastică, plastică sau vâscoasă.

Astfel, în legile de comportare nu intervin decât componentele tensorilor tensiunilor, deplasărilor și ale derivatelor în raport cu timpul, corelate prin relații polinomiale dependente de parametri constanți. Comportarea mecanică a pământului poate fi descrisă de un sistem de ecuații cu derivate parțiale, liniare sau neliniare în raport cu componentele tensorilor, cu coeficienți constanți, constante în timp. Astfel de modele au o serie de limitări care nu pot simula unele fenomene examinate la experimentări și în exploatarea pământurilor, de aceea, acestea au fost suplimentate cu o altă categorie de modele numite „complexe”.

Așa cum în modelele tradiționale se iau în considerare numai efectele mecanice asupra pământurilor, omițându-se efectele termice, electrice etc., acestora li s-au dedicat studii speciale care cuprind o categorie restrânsă de pământuri (cele înghețate, cele supuse la variații importante de temperatură etc.). Similar, la

folosirea acestor modele se consideră că procesele mecanice sunt lente, omițându-se forțele de inerție în ecuațiile de evoluție, analizându-se stările de echilibru sau procesele care iau în considerare stări succesive de echilibru. Se utilizează modelele cele mai simple (modelul elastic liniar care este cel mai bine studiat și cel mai aplicat), după care modelele mai generale, mai complexe destinate pentru a simula o gamă largă de teste experimentale, dar care încă nu au nici rezolvări complete și nici confirmări în practica actuală. Aceste modele simple dau în continuare rezultate practice satisfăcătoare în unele cazuri, dar trebuie să se precizeze la fiecare caz particular limitele de valabilitate fizică.

**Modelul elastic liniar** este cel mai utilizat în mecanica pământurilor, considerându-le pe acestea medii omogene și izotrope. Legea de comportare mecanică este o relație liniară, cu coeficienți constanți între tensorii de tensiune și cei de deformație sau între componentele lor. Legea dată modelează destul de corect realitatea fizică în domeniul deformațiilor reversibile dominante (după cum se știe, la pământuri, chiar la încercări reduse, la cele mai multe categorii, deformațiile elastice sunt însoțite și de deformații remanente), domeniu destul de restrâns la pământuri.

Prin urmare, rezultatele practice sunt satisfăcătoare în unele cazuri, unde se cere o precizie limitată, fiindcă aparatura și tehnica de determinare a indicilor geotehnici sau care servește la verificarea *in situ* a indicațiilor teoretice este încă rudimentară, iar efectele mai fine sunt pierdute la măsurări.

Astfel, problema determinării consolidării pământurilor se rezumă la una de analiză numerică clasică sau de aplicare a teoriei elementelor finite.

S-a examinat că atunci când rezistența pământului crește cu adâncimea, modelul elastic furnizează rezultate satisfăcătoare din punct de vedere practic asemănate cu măsurători *in situ* în raport cu mărimea eforturilor exterioare care nu conduce la depășirea limitei de elasticitate a masivelor de pământ.

În cazul în care rezistența pământurilor scade cu adâncimea, diferențele dintre rezultatele teoretice și măsurători depășesc limita admisibilă în practică. La problemele privind capacitatea portantă, modelul elastic nu dă rezultate pentru calculul fundațiilor de suprafață și nici la cele de adâncime, având de cele mai multe ori supradimensionări inadmisibile, sau uneori soluții insuficiente, dat fiind faptul că masivul lucrează în domeniul plastic.

**Modelul plastic** se folosește în special în problemele de capacitate portantă, calculându-se starea de tensiuni în momentul când echilibrul este pe punctul de a fi rupt printr-o ușoară creștere a sarcinilor care acționează la suprafață. Așa cum se cunoaște, pentru aplicațiile practice, determinarea acestui câmp critic de tensiuni este fundamentală, în raport de valoarea lui stabilindu-se celelalte criterii de calcul. Provizoriu, pentru aceste cazuri s-a întrebuițat legea empirică a lui Coulomb, care analitic se prezintă sub forma unei relații între componentele tensiunii. Însă pentru rezolvarea problemei în spațiu sunt necesare șase relații. În acest caz, se utilizează, pe lângă relația lui Coulomb, și cele trei ecuații de echilibru ale lui Cauchy.

În cazul problemei plane, ecuația lui Coulomb și cele două ecuații ale lui Cauchy sunt suficiente. În cazul stării de revoluție se introduce o ipoteză suplimentară pentru a preciza sistemul și, de cele mai multe ori, se utilizează relația lui Haar-Kaiman. Totuși, în cazul problemei tridimensionale, ipoteza lui Coulomb nu poate fi extinsă în cadrul unei teorii pur statice. Drucker și Prager [9] au emis ipoteza potențialului asociat la criteriul lui Coulomb, obținându-se un sistem complet de ecuații cu derivate parțiale care verifică cele nouă necunoscute (șase componente ale tensorului tensiunilor și trei componente ale vectorului deplasare) în funcție de trei coordonate spațiale și de parametrul timp.

**Modelele complexe (elasto-plastice)** sunt indicate la utilizarea pentru descrierea comportării pământurilor sub acțiunea unor încărcări cu intensități progresive în condițiile în care variază și densitatea.

Astfel, modelele tradiționale prezintă printre alte inconveniente și faptul că nu pot descrie toată istoria mecanică sau a unui material ca rezultat al aplicării ciclurilor succesive de încărcare–descărcare. Anume la pământuri s-a remarcat că trecerea în stare plastică este însoțită de variații însemnate ale densității, ceea ce influențează în mod sensibil rezistența la forfecare.

Prin urmare, se evidențiază rolul densității ca parametru definitoriu încât limita de plasticitate, densitatea atinge o valoare critică care este în funcție de presiunea medie. Curgerea plastică se face cu un volum constant, dar această proprietate cinematică nu este suficientă pentru a defini comportarea pământurilor în domeniul plastic.

Astfel, autorii Sawc-Zuk și Stutz [8, 10] recomandă un model complex al pământului, unde legea constitutivă are forma unei relații tensoriale între tensiuni, vitezele lor, viteza de deformare și densitatea acestuia, însă, odată atinsă densitatea critică, această lege tinde spre legea plasticității perfecte. Pornind de la aceste ipoteze, Sawc-Zuk și Stutz dau cea mai generală expresie a legii sub formă canonică raportată la densitate și de alți zece parametri. Fără îndoială, confirmarea experimentală, destul de dificilă, este în curs, unde se fac încercări de a lua în considerare densitatea pământurilor, care are o importanță deosebită.

Însă există modele teoretice mai generale care arată și alți parametri reologici pentru pământuri, de exemplu coeziunea, vâscozitatea, unghiul de frecare interioară ce variază cu temperatura, densitatea, cu presiunea medie în urma legilor determinate experimental. Dar în cazul dat, evoluția proprietăților mecanice ale pământurilor nu vor putea fi reprezentate prin mărimi constante.

**Modelele mediilor polifazice** caracteristice pământurilor sunt utilizate la modelarea și simularea comportării acestora. La început, pământurile erau considerate medii monofazice, avându-se în vedere numai faza solidă, considerând că apa liberă din pori lipsește (aceștia se presupun ca pori deschiși și se putea neglija acțiunea

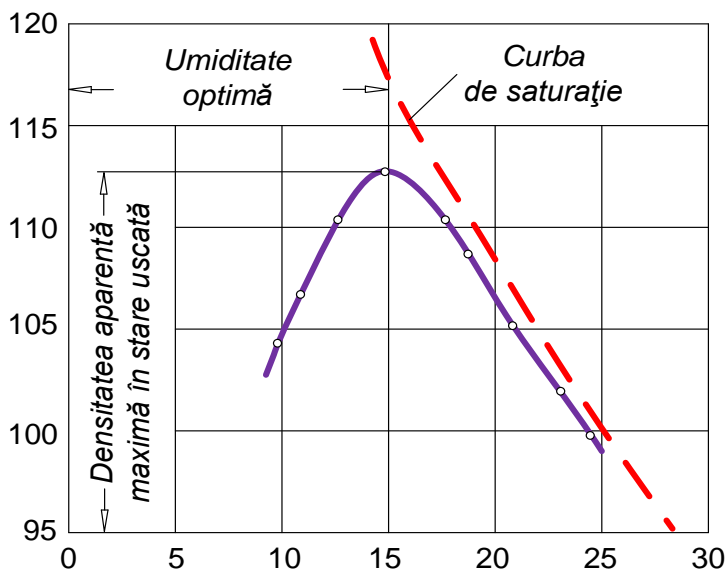


fazei gazoase). Însă, în mod uzual, apa subterană se află în porii masivului de pământ care influențează esențial modul de repartiție și modul de transmitere a tensiunilor și deformațiilor la pământurile saturate ori parțial saturate. Interacțiunea dintre faze modifică sensibil modul de comportare a pământului în timp, mai cu seamă în problemele de consolidare, cu migrarea apei prin pori atunci când masivul de pământ este supus la acțiunea sarcinilor. Această eliminare progresivă a apei din pământ duce la modificarea proprietăților mecanice a masivului de pământ a cărui rezistențe mecanice cresc în timpul procesului de consolidare.

#### **1.4. Stadiul actual în domeniul compactării prin vibrații**

Potrivit datelor, Proctor a propus în anul 1933 o procedură cu privire la determinarea densității maxime a pământului în funcție de conținutul de apă și efortul de compactare [11, 12, 13, 46]. Încercarea Proctor [12] normală în general se aplică pentru stabilirea caracteristicilor de compactare ale terasamentelor fundațiilor cu destinație specială cum sunt cele de la structurile rutiere, căi ferate, aeroporturi etc. Încercarea Proctor modificată se aplică la stabilirea caracteristicilor de compactare ale straturilor de bază, ale straturilor și substraturilor fundațiilor pentru drumuri ori din pământuri stabilizate mecanic, ale barajelor și digurilor din pământ.

Gradul de compactare maxim îl obținem la umidități optime la care se realizează o anumită densitate aparentă a pământului în stare uscată maximă (fig. 1.5).



**Fig. 1.5. Curba de variație a densității aparente în stare uscată în funcție de umiditate [15, 46]**

Altfel-spus, gradul de compactare reprezintă raportul dintre densitatea aparentă în stare uscată efectivă a terenului și densitatea de referință determinată prin metoda Proctor, conform prevederilor SR EN 13286-2:2011.

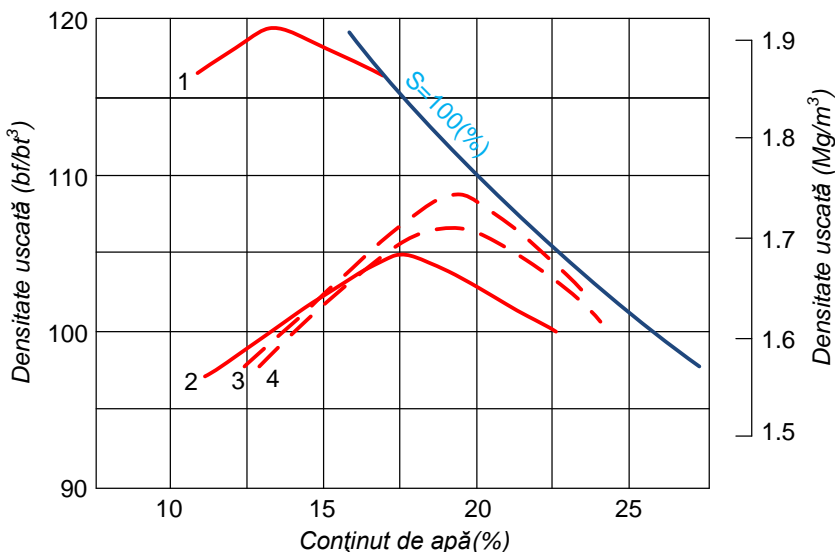
Pe parcursul anilor, mulți cercetători au corelat metoda de compactare cu parametrii esențiali care influențează comportamentul la compactarea solurilor ca de exemplu: conținutul optim de apă, tipul solului și energia de compactare. În figura 1.6 se poate observa influența metodei de compactare utilizată, unde același tip de sol este compactat prin diferite metode tehnologice.

Metoda de compactare depinde în principal de tipul solului și de disponibilitatea echipamentelor aflate pe șantierul de construcții [11, 17, 46]. Nu există reguli fixe pentru alegerea celei mai adecvate metode de compactare, ci doar linii care indică direcții justificate de determinările efectuate *in situ* pe teren.

În literatura de specialitate sunt recunoscute cele mai frecvente metode de compactare utilizate în construcții care se bazează pe apăsare, vibrare, presiune, frământare și compactare dinamică.

În acest mod, pentru compactarea terenurilor cu compoziție granulară grosieră se recomandă utilizarea forțelor dinamice generate de echipamentele tehnologice prin vibrații sau impact, iar pentru soluri prăfoase utilizarea rulourilor cu crampoane [13, 44, 46].

Pentru compactarea stratului de bază și a substraturilor din infrastructura fundațiilor de autostrăzi, parcuri etc. Holtz și alții [17] recomandă utilizarea rulourilor vibratoare. Zou și alții [18] pledează pentru folosirea compactării dinamice a rambleelor rutiere înalte [46].



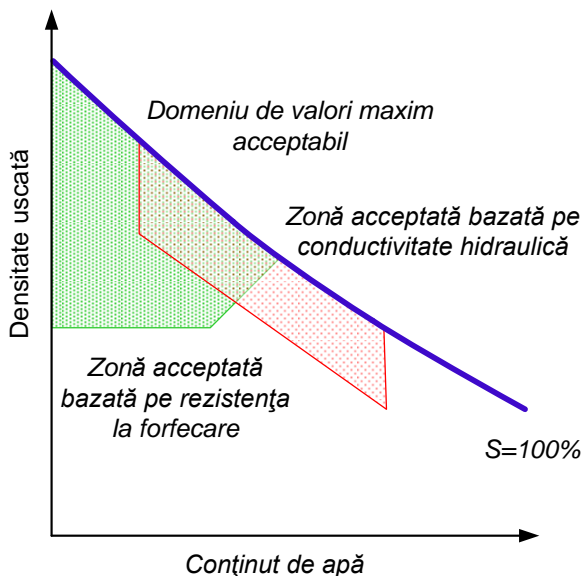
**Fig. 1.6. Curbe de compactare obținute în acest mod: 1, 2 - în laborator prin compactare statică (cu forță variabilă sau constantă); 3 - în teren cu compactare cu tren de pneuri după 6 treceri; 4 - în teren prin compactare cu ruloiu cu crampoane după 6 treceri; S - curba de saturație [46].**

Una dintre variabilele cu control asupra procesului de compactare este conținutul de apă din sol, care se determină ca valoare optimă prin testul Proctor. Totuși, în unele cazuri este recomandat să se efectueze compactarea solurilor cu adăugarea unei cantități de apă peste conținutul optim de apă, fiindcă acest lucru conferă o gamă mai variată de proprietăți solului și prin apariția fenomenelor de aspirație și de conducție cum este conductivitatea termică și hidraulică. [44]

Tabelul 1.1 conține o centralizare a recomandărilor privind metodele și echipamentele tehnologice de compactare pentru diferite tipuri de soluri [13, 19, 46].

**Tabelul 1.1. Metodele și echipamentele tehnologice de compactare**

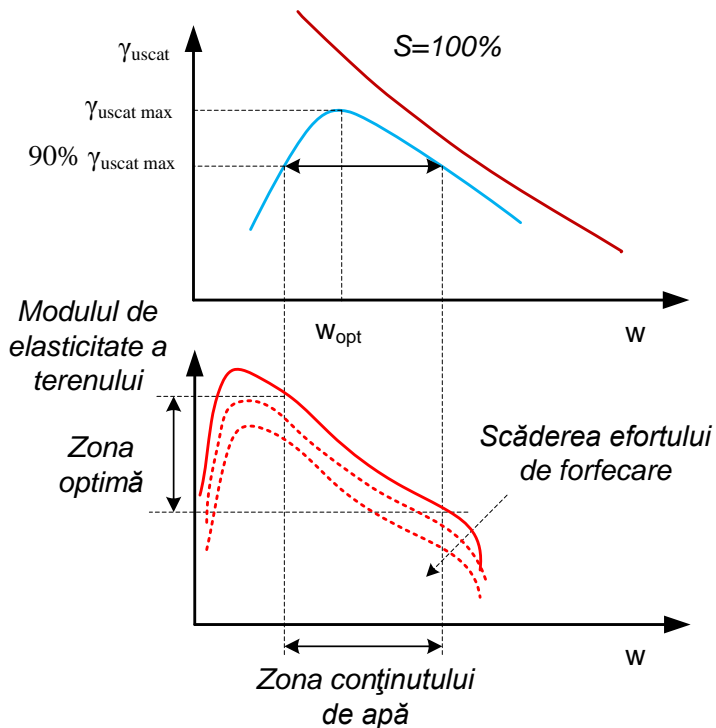
<i>Sol</i>	<i>Prima alegere</i>	<i>A doua alegere</i>
Umplutură de rocă	Rulou vibrator	Rulou pe pneuri
Soluri plastice	Rulou cu crampoane tip picior de oaie	Compactor pe pneuri
Soluri cu plasticitate mică	Rulou cu crampoane tip picior de oaie	Compactor vibrator mixt
Nisipuri și pietrișuri plastice	Rulou vibrator, compactor cu pneuri	Rulou cu crampoane
Nisipuri și pietrișuri nămoase	Rulou vibrator	Rulou cu crampoane tip picior de oaie, compactor cu pneuri
Nisipuri curate	Rulou vibrator	Compactor cu impact



**Fig. 1.7. Zonarea solului în funcție de conținutul de apă [20]**

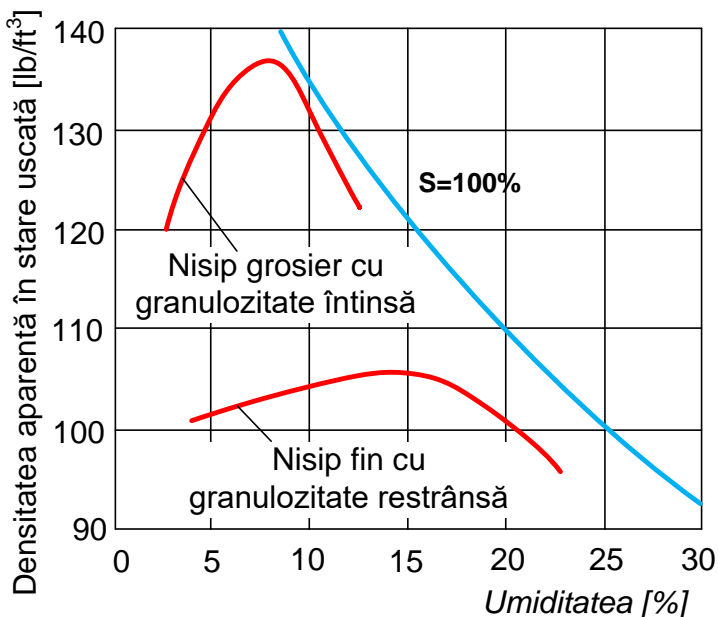
Așadar, autorii Daniel și Benson [20] recomandă diferite intervale ale conținutului de apă și ale densității în stare uscată a solului compactat în așa mod, încât acesta să fie utilizat ca o barieră impermeabilă (cu conductivitate hidraulică scăzută) sau zonele în care solul compactat poate fi utilizat ca rambleu în cazul în care este nevoie de compresibilitate redusă și rezistență mare la forfecare. În figura 1.7 se dă în mod schematic diferitele intervale de conținutul de apă în funcție de proprietățile și aplicațiile solului [46].

Pentru proiectarea sistemelor rutiere se utilizează metode empirice bazate pe valorile mici ale efortului de forfecare din sol [21, 22, 46]. Figura 1.8 demonstrează modul în care variația efortului de forfecare este influențată de conținutul de apă.



**Fig. 1.8. Variația efortului de forfecare în funcție de conținutul de apă din sol [46]**

Astfel, parametrii solului ca densitatea inițială în stare uscată, distribuția granulometrică, forma particulelor și conținutul de apă sunt factorii cei mai importanți care furnizează informații cu privire la eficiența procesului de compactare. Așadar, diferite tipuri de soluri au curbe de compactare variate, pe care le putem observa în figura 1.9.

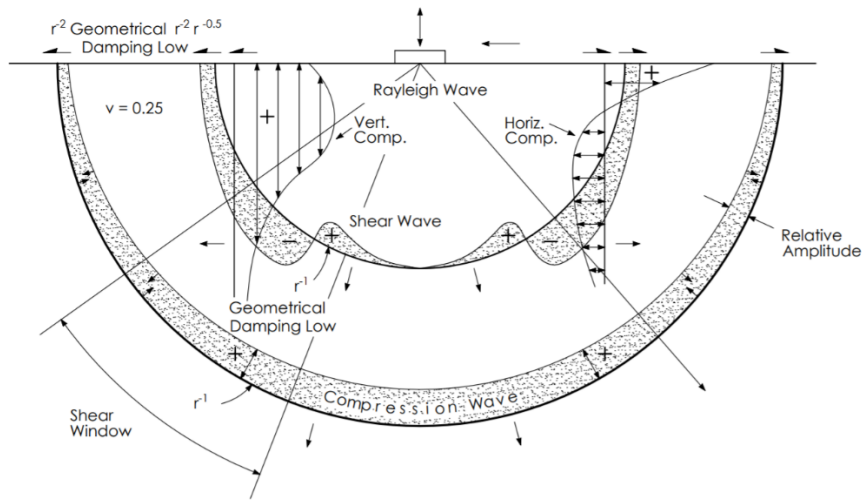


**Fig. 1.9. Curbele de compactare pentru diferite tipuri de teren în dependență de umiditate [15]**

Frecvența de lucru, greutatea ruloului, dimensiunea acestuia și numărul trecerilor sunt parametri importanți care țin de echipamentul de compactare folosit. Astfel, după alegerea metodei și a utilajului de compactat, rezultatul final al procesului de compactare este influențat de capacitatea de punere în operă a procesului tehnologic [16, 17, 19, 44, 46].

Când solul este compactat, energia dinamică sau statică a compactorului este transmisă spre sol ca o combinație de unde P, S și Rayleigh și se propagă în direcții radiale față de compactor [23]. În cazul când undele sunt generate de compactor, frecarea din interiorul solului diminuează energia undelor prin disipare. Când unda interacționează cu solul, aceasta produce comprimarea și

distorsiunea particulelor prin redistribuirea acestora, având ca efect creșterea densității solului. Figura 1.10 reprezintă modul în care undele P, S și Rayleigh se propaga față de suprafața solului [23, 46].

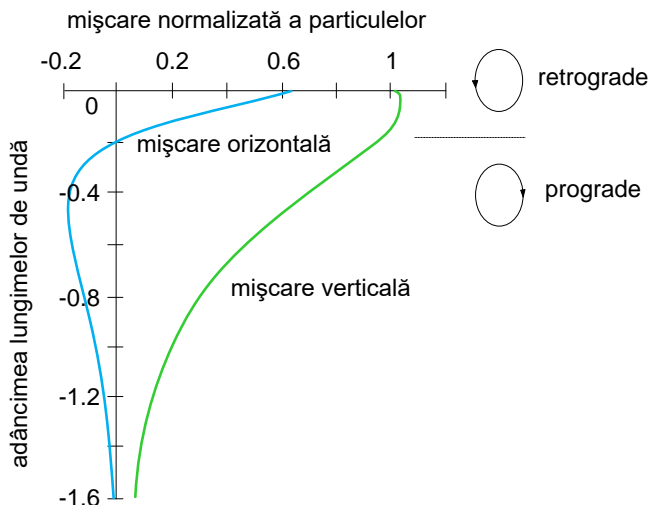


**Fig. 1.10. Propagarea în direcții radiale a undelor elastice prin sol**

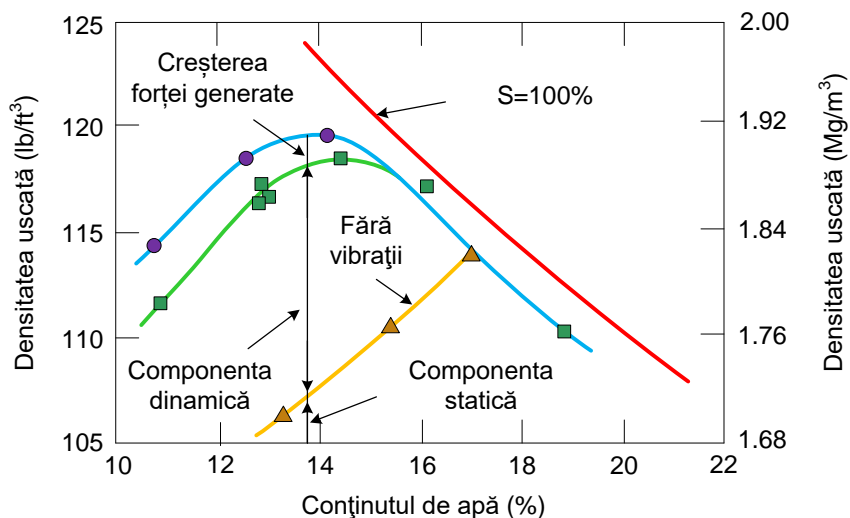
Santamarina [24] argumentează că mișcarea particulelor pe direcție orizontală este diminuată mai rapid decât a celei pe direcție verticală, aceasta fiind reprezentat în figura 1.11.

Figura 1.12 demonstrează cum componenta dinamică a compactării este utilizată în cazul materialelor macrogranulare și ajută la creșterea densității în stare uscată a solului referitor la compactarea dinamică. Toate acestea sunt generate de rotația unor mase excentrice, fiind montate în interiorul ruloului.





**Fig. 1.11. Mișcarea pe direcție orizontală și verticală a particulelor în funcție de adâncime [24, 46]. Pe ambele axe dimensiunile sunt date în metri**



**Fig. 1.12. Curbe de compactare a solului compactat cu și fără efect dinamic [16, 17, 44, 46]**

Prin urmare, efectul conjugat al factorilor geodinamici ai terenului cum sunt compresibilitatea, coeziunea, elasticitatea, capacitatea de drenare, frecarea internă etc. conduce la o influență semnificativă a parametrilor procesului de compactare, particularizând în acest mod fiecare tip de teren.

### 1.5. Modelarea pământurilor necoezive încărcate dinamic vertical

La modelarea pământului se ia în considerare faptul că în zona de contact între cilindru și sol apar efecte elasto-plactice. Astfel, la adâncime se dezvoltă o comportare elastică [25]. Folosind procedeul suprapunerii efectelor, se consideră că solul este compus din două substructuri, zonele plastică și elastică, modelate separat. La final, rezultatele sunt suprapuse, îndeplinind condițiile de compatibilitate.

La modelarea comportării solul elastic este reprezentat ca un semispațiu linear elastic, fiind alcătuit dintr-un material omogen cu densitatea specifică  $\rho$ .

Omițând efectul vâscozității, relația efort–deformație specifică este descrisă prin intermediul a două constante elastice, care în dinamica solurilor sunt modulul rezistenței la tăiere  $G$  și coeficientul lui Poisson  $\nu$ . Astfel, întrucât în problema dată se va aplica modelarea semispațiului prin intermediul unui con, este convenabil să fie luată în considerare o altă pereche de caracteristici fundamentale, și anume, viteza de propagare a undelor tăietoare (secundară)  $v_s$  și viteza de propagare a undelor longitudinale sau de dilatare (primară)  $v_p$ .

Astfel, relațiile de legătură dintre acești parametrii sunt:

$$G = \frac{E}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu}, \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{și} \quad \nu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2} \quad (1.1)$$

unde  $E$  este modulul de elasticitate.

Semispațiul este idealizat printr-un con elastic semiinfinit de înălțime  $\zeta_0$ , iar suprafața de contact dintre sol și cilindru este considerată ca o bază rigidă fără masă, de arie  $A_0$  (fig. 1.13).

Raza echivalentă a unui disc circular de aceeași arie cu baza rigidă este notată  $r_0$ . Deschiderea unghiulară a conului este determinată de raportul  $\zeta_0/r_0$ . Prin aplicarea încărcării pe disc, eforturile din semispațiul considerat vor acționa pe o suprafață ce crește cu adâncimea  $A_\zeta = A_0(\zeta/\zeta_0)^2$ . Partea exterioară a conului este de importanță neglijabilă și deci nu este luată în considerare.

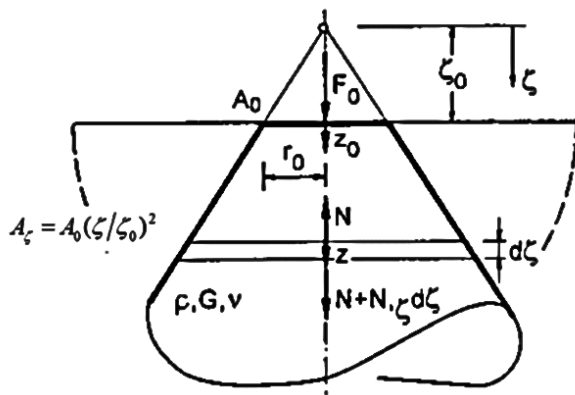
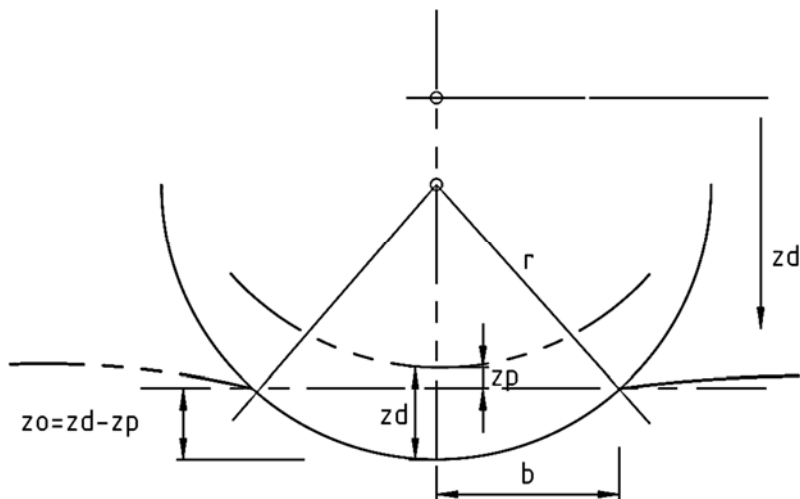


Fig. 1.13. Modelul conului semiinfinit elastic

Modelarea zonei plastice este realizată pentru cazul specific al compactării cu cilindru vibrator. Deformațiile specifice la tăiere mari care apar în zona de contact cilindru-sol determină deformații plastice care vor reprezenta compactarea solului.

Dimensiunile suprafeței de încărcare corespund cu dimensiunile ariei rectangulare considerate ( $a = a_0$ ,  $b = b_0$  și deci  $A = A_0$ ), iar datorită echilibrului necesar la nivelul sol-cilindru, forța de contact este egală cu forța elastică de interacțiune ( $F = F_0$ ). Deplasarea totală elasto-plastică a cilindrului  $z_d$  constă din deformațiile elastică  $z_0$  și plastică  $z_p$  ale solului (figura 1.14).



**Fig. 1.14. Deformația elasto-plastică a solului necoeziv sub impactul cilindrului**

Relația dintre forța de contact și deformația plastică este obținută prin utilizarea formulei dată de teoria capacității portante a fundațiilor pe teren. Astfel, capacitatea portantă este:

$$N_B = A\sigma_B \quad (1.2)$$

în care  $A = 4ab$  este aria suprafeței de încărcare, iar

$$\sigma_B = cN_c s_c + \gamma_o t N_q s_q + \gamma 2b N_\gamma s_\gamma \quad (1.3)$$

este tensiunea de compresiune capabilă pe teren dată de formula Prandtl-Buisman unde:

$c$  - coeziunea solului;

$\gamma$  - greutatea specifică a solului;

$\gamma_o$  - greutatea specifică a umpluturii laterale (eventuală);

$t$  - grosimea umpluturii;

$N_c, N_q$  și  $N_\gamma$  - factori ai capacității portante;

$s_c, s_q$  și  $s_\gamma$  - coeficienți de formă.

Deoarece solul considerat (material de umplutură granular) este necoeziv,  $c = 0$ , iar cilindrul se află la suprafața terenului  $t = 0$  (nu există umplutură laterală). Deoarece deformația plastică  $z_p$  este relativ mică în raport cu raza  $r$  a cilindrului, lățimea  $b$  poate fi exprimată prin  $\sqrt{2rz_p}$  (neglijând  $z_p^2$ ). Așadar, capacitatea portantă a materialului poate fi dată de următoarea expresie:

$$N_B = 16\gamma N_\gamma ar z_p = 16\gamma N_\gamma ar (z_d - z_0) \quad (1.4)$$

unde coeficientul de formă  $s_\gamma$  s-a considerat unitar ca fiind pentru suprafețe dreptunghiulare înguste.

Factorul capacității portante corespunzător greutateii specifice se calculează prin relația:

$$N_\gamma = \left[ e^{\pi g \phi} tg^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + 1 \right] tg \phi \quad (1.5)$$

Toate constantele obținute în expresia capacității portante se grupează într-un nou parametru de plasticitate:

$$k_p = 16\gamma N_\gamma ar \quad (1.6)$$

și astfel, având în vedere echilibrul forțelor ( $F = N_B$ ), componenta plastică a forței de contact se obține:

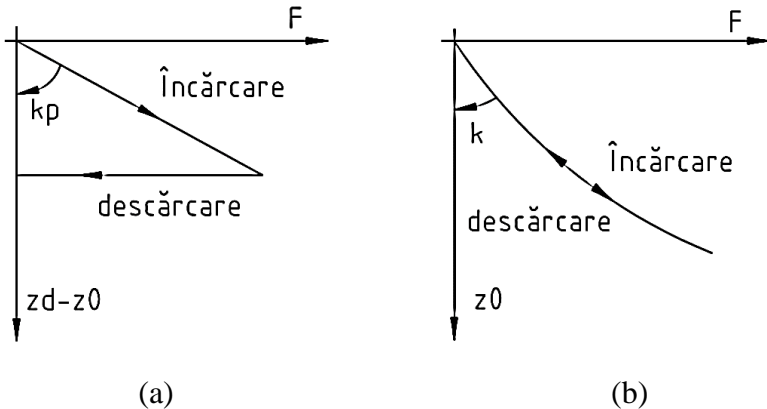
$$F_p = k_p z_p = k_p (z_d - z_0) \quad (1.7)$$

Din această expresie observăm că echilibrul plastic se dezvoltă ca o relație lineară forță–deplasare. Deoarece pe parcursul fazei de descărcare (de ridicare a cilindrului) în sol au loc doar efecte elastice, relația 1.7 este valabilă numai pentru faza de încărcare (fig. 1.15, a).

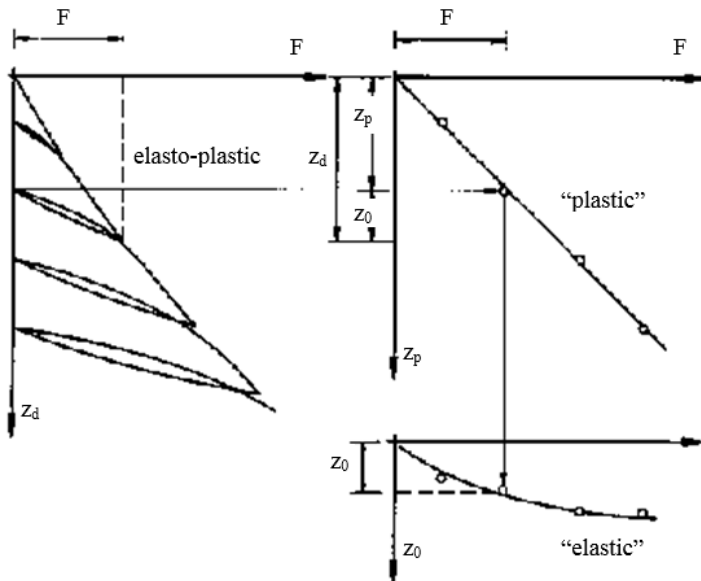
În figura 1.16 este reprezentată comportarea elasto-plastică a solului încărcat de cilindrul vibrator. În conformitate cu teoria prezentată, deformațiile plastice sunt lineare (relația 1.7).

Materialul compactat, cu ambele substructuri considerate în modelarea acestuia, și cilindrul excitat dinamic al cilindrului vibrator sunt suprapuse, respectând condițiile de compatibilitate.

Luând în considerare că între sol și cilindru nu pot apărea întinderi, trebuie luată în calcul pierderea contactului.



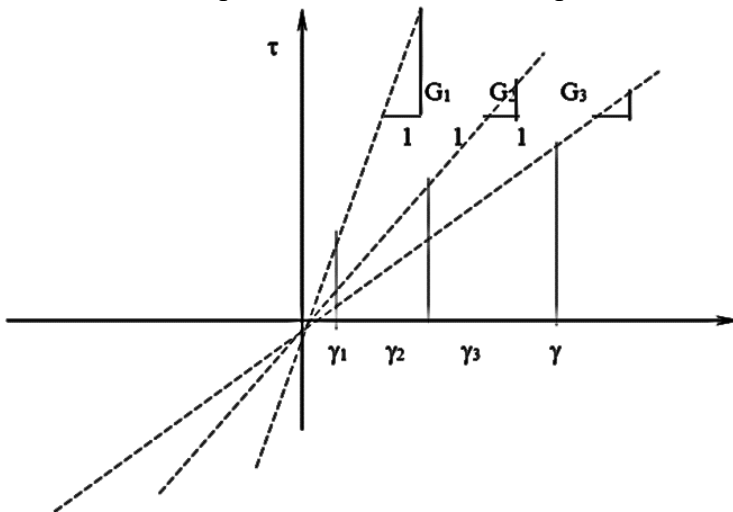
**Fig. 1.15. Relația forță–deplasare în cazul comportărilor plastice ideale (a) și elastice ideale (b)**



**Fig. 1.16. Stabilirea punctuală a deformațiilor plastice și elastice ale solului**

Proprietățile importante ale solurilor considerate într-o analiză dinamică sunt modulul de rezistență la tăiere  $G$  și raportul de vâscozitate  $D$ , acestea determinând relația caracteristică tensiune de tăiere–deformație specifică.

Forma generală a relației de legătură dintre tensiune de tăiere și deformație specifică care apare în cazul unei solicitări dinamice este reprezentată în figura 1.17. Un ciclu de încărcare se definește ca începând și sfârșind într-un același punct dat de o tensiune de tăiere maximă. O buclă, reprezentată printr-o revenire completă a tensiunii, este descrisă prin intermediul celor doi parametri -  $G$  și  $D$ .

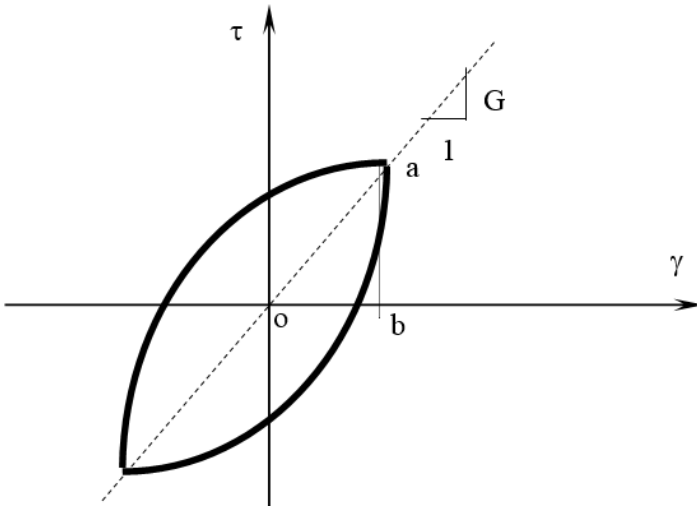


**Fig. 1.17. Relația tensiune tăietoare–deformație specifică pentru solicitarea dinamică**

Modulul de rezistență la tăiere  $G$  este exprimat ca panta secantei determinată de punctele extreme ale unei bucle histeretice, iar raportul de vâscozitate  $D$  este o mărime proporțională cu aria închisă de bucla respectivă [26].

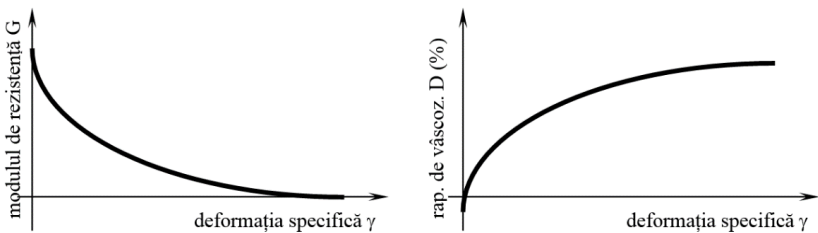
$$G = \arctg \frac{ab}{ob} \quad (1.8)$$

$$D = \frac{A_{loop}}{4\pi A_{abo}} \quad (1.9)$$



**Fig. 1.18. Definierea modului de rezistență la tăiere și a raportului de viscozitate**

Luând în considerare că bucla histeretică este determinată de o anumită magnitudine a deformației specifice la tăiere  $\gamma$ , modulul de rezistență la tăiere  $G$  și raportul de vâscozitate  $D$  sunt funcții de deformația specifică impusă de tăiere (fig. 1.19.).



**Fig. 1.19. Variația modului de rezistență și a raportului de viscozitate cu deformația specifică**



## 1.6. Oportunitatea și obiectivele monografiei

**Oportunitatea** acestei lucrări se bazează pe cerințe tehnice și economice justificate prin următoarele elemente:

- exigențe de mărire a nivelului de performanță a echipamentelor tehnologice din domeniul construcțiilor cu monitorizare inteligentă;

- control, analiză permanentă, dezvoltarea continuă a utilajelor și echipamente tehnologice specifice cu includerea unor sisteme de ultimă generație cu impact asupra capacității tehnologice și a creșterii eficienței energetice;

- reglementările normative privind indicatorii de performanță cu impunerea parametrilor operaționali esențiali ce trebuie să caracterizeze, la nivel internațional, gradul de performanță a lucrărilor de compactare;

- automatizarea proceselor tehnologice prin utilizarea tehnicilor avansate și a metodelor moderne care după implementare asigură suportul decizional și condițiile de independență față de influența operatorului responsabil la utilajul monitorizat.

Stadiul actual și analiza critică în domeniul folosirii vibrațiilor pentru optimizarea procesului tehnologic de compactare combinate cu elementele de oportunitate enumerate anterior relevă și facilitează necesitatea acestei lucrări.

Astfel, conform analizei de oportunitate, precum și a cerințelor ce fundamentează necesitatea acestor cercetări, **scopul** acestei lucrări accentuează următoarele:

- aprecierea instrumentală și informațională a legităților structurale și funcționale care conduce la interacțiunea dintre echipamentul vibrator și materialul compactat;

- verificarea parametrilor funcționali și păstrarea acestora în zona optimă;

- monitorizarea instrumentală și informațională.

Luând în considerare necesitatea și oportunitatea acestei lucrări, sunt stabilite următoarele **obiective principale**:

- evaluarea nivelului actual al cercetărilor în domeniu;
- stabilirea modelelor reologice care reprezintă baza teoretică pentru progresarea și fundamentarea caracteristicilor elastice, disipative și dinamica ansamblului structural și funcțional între teren–echipament;
- indicarea modelelor de interfață prin crearea structurală și corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative în scopul optimizării procesului de compactare;
- comportarea în regim static și în regim dinamic a modelelor reologice în ideea de a identifica și evidenția elementele de specificitate a interacțiunii organ de lucru și material procesat;
- corelații caracteristice ale mărimilor valorilor de laborator și a mărimilor obținute în teren *in situ* pentru agregate minerale, pământ natural și stabilizat ecologic.

## CERINȚELE PARAMETRICE ALE TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE A PĂMÂNTURILOR STABILIZATE

### 2.1. Generalități

*Compactarea* reprezintă un proces de îndesare a pământului (sau orice alt material de umplură) ca rezultat al utilizării echipamentelor tehnologice. În acest mod, aplicarea succesivă a forțelor de compresiune sau a sarcinilor dinamice pe suprafața terenurilor de fundație ori a straturilor puse în operă la lucrările de terasamente au drept scop redistribuirea particulelor solide cu eliminarea pe cât e posibil a aerului și apei din structura internă a terenului [46].

După compactarea pământului vor crește valorile greutateii volumice, a rezistenței la tăiere și a modulului de deformație simultan cu scăderea tasării specifice.

Obiectivele compactării terenurilor sunt:

a) în cazul pământurilor:

- mărirea densității și a capacității portante a straturilor rutiere;

- scăderea compresibilității și a permeabilității;

b) în cazul mixturilor asfaltice:

- mărirea densității;

- mărirea stabilității;

- mărirea rezistenței la uzură.

În funcție de modul cum este aplicată sarcina de compactare peste terenul analizat, se deosebesc câteva metode de compactare:

- statică (prin cilindrare);

- dinamică (prin vibrație, impact, frământare).

În unele cazuri, aceste metode ar putea fi combinate între ele.

Acțiunea statică supusă pământului prin compactare se efectuează prin presiunea provocată prin rostogolirea unui cilindru sau a unei roți cu pneu, pe direcție înainte și înapoi pe suprafața terenului, operație care se cheamă cilindrare. La prima trecere, adâncimea de pătrundere a cilindrului este mare și ca urmare suprafețele de sprijin sunt tot mai mari, iar în consecință presiunile unitare care se transmit materialului sunt mai mici. În timp ce crește numărul de treceri scade adâncimea de pătrundere și respectiv suprafața de sprijin.

La viteze mici ale cilindrilor compactori greutatea transmisă prin treceri succesive ale utilajului pe un strat o putem asimila cu o sarcină statică care transmite presiuni pe teren în zona de contact. Astfel de compactare se aplică pentru o gamă mare de tipuri de pământuri, de la nisipuri și pietrișuri la argile și chiar anrocamente [13] \*\*\*.

După principiul de construcție și după modul de deplasare compactoarele care lucrează prin cilindrare pot fi: cu rulouri netede tractate sau autopropulsate, cu rulouri cu crampoane cu diferite configurații geometrice (plate sau cilindrice), cu tren de pneuri sau combinații între acestea.

Pe parcursul desfășurării procesului tehnologic, compactoarele cu pneuri prezintă avantajul că au posibilitatea variației presiunii în pneuri și lestagea sau delestarea prin atașare sau detașare de greutate suplimentare. Un alt avantaj este că au mersul reversibil și nu trebuie spații de întoarcere. Astfel, compactarea terenului se efectuează prin presiunea statică a pneurilor pe suprafața de contact, ce transmit în teren presiuni sub formă de bulb. Pentru concretizarea tehnologiei de compactare este necesară cunoașterea presiunii din pneuri, presiunea specifică asupra stratului compactat, la fel, trebuie să cunoaștem grosimea stratului și numărul de treceri ale utilajului de compactare.

În figura 2.1 sunt reprezentate o gamă variată de utilaje de compactare care nu utilizează vibrațiile în procesul de lucru.



***Fig. 2.1. Exemple de utilaje care realizează compactarea prin acțiune statică asupra terenului***

*Compactarea dinamică* este o metodă cu mult mai eficientă, care are o gamă largă de utilizare. Metoda dată constă în transmiterea vibrațiilor la stratul de pământ supus compactării, care produce o deplasare relativă a particulelor și o repartizare mai compactă a lor. Astfel, compactarea prin vibrație oferă rezultate foarte bune în situația materialelor neomogene și necoezive (nisipuri, bolovănișuri, pietrișuri, anrocamente) sau materialelor slab coezive.

Așadar, din practică cunoaștem că frecvența vibrațiilor trebuie să depășească 1500-1600 cicluri/min., dar să fie mai mică decât 3 g, întrucât creșterea greutateii volumice peste această valoare este practic nulă [13] \*\*\*.

*Compactarea prin vibrație* se efectuează cu ajutorul vibratoarelor de suprafață și de adâncime care transmit unde de compresiune succesive unidirecționale sau circulare masei de

material. Prin treceri cu vibrații repetate granulele de material sunt puse în mișcare de forțe de inerție proporționale cu masele lor, reducându-se frecarea dintre acestea, care permite o așezare mai densă pe măsura micșorării golurilor [44, 46].

*Utilajele de compactare prin vibrație.* Adesea se utilizează vibratoare cu rulouri lisse și vibratoare cu picior de oaie cu greutatea de 8-16 tone, vibratoare manevrate cu utilaje de ridicat, plăci vibratoare care au rulouri lisse de mai multe tipuri [13] \*\*\*:

- plăci grele de 1,5-2,5 tone cu suprafața de 0,25-0,50 m<sup>2</sup> și frecvențe de 2000-3000 vibrații/min.;
- plăci ușoare de 0,1-0,2 tone cu suprafața de 0,1-0,25 m<sup>2</sup> și frecvența de 3000-5000 vibrații/min.

*Compactarea prin batere* se efectuează prin aplicarea periodică de la o anumită înălțime  $h$  a unui corp de masă  $m$  asupra straturilor. Astfel, compactarea are loc sub acțiunea impulsurilor transmise materialului prin undele periodice de compresiune provocate de șoc. Pentru compactarea prin batere se folosesc utilaje ca maiuri și plăci cu baza circulară sau pătrată, cu latura de 70 și 150 cm și cu greutatea de 1-5 tone, unde centrul de greutate este situat cât mai jos pentru îndeplinirea unei căderi verticale. O mare eficiență obținem prin compactarea cu maiuri foarte grele și supergrele.

Acest procedeu de sporire a capacității portante a terenurilor de fundare constă în aplicarea de lovituri repetate, pe aceeași amprență, cu un mai având masa de 10...30 t, ce cade de la înălțimi de 10...30 m. În acest mod, loviturile se aplică în 3...4 faze pe o rețea de ochiuri (de regulă triunghiulară sau pătrată), trasate anterior pe teren, înainte de fiecare fază.

Prin introducerea unor energii foarte mari în teren se stabilește comprimarea terenului pe adâncimi considerabile și creșterea presiunii apei din pori, uneori chiar și până la lichefiere. Compactarea cu maiuri foarte grele și supergrele o putem folosi pentru sporirea capacității portante a pământurilor necoezive, slab coezive sau coezive cu diferite grade de umiditate și a umpluturilor neconsolidate. La pământurile coezive grosimea optimă a straturilor

variază între 20-50 cm, iar la pământurile necoezive între 25-70 cm. În dependență de greutatea maiului, sunt necesare 4-6 treceri, la un număr de minim 4 lovituri pe aceeași urmă [13] \*\*\*.

*Maiul* poate fi confecționat monocorp sau din module asamblate din oțel masiv sau beton armat turnat într-o manta metalică din tablă de 15...20 mm. Forma maiului este tronconică cu baza mare în jos și ușor convexă, pentru a ușura desprinderea de teren. Alt utilaj folosit este maiul pneumatic cu greutateți de 100-1200 kg, 50-60 lov./min. și salturi de 15-20 cm.

La volumele mici și spațiile înguste sunt utilizate vibromaiuri portative cu greutateți de 20-200 kg, acționate de motoare termice, electrice, posibil cu aer comprimat, cu o frecvență de 500-600 lov./min. Când raportul dintre forța perturbatoare a vibratorului de suprafață și greutatea acestuia depășește o anumită valoare, are loc desprinderea periodică a corpului vibratorului de material, producându-se astfel, pe lângă vibrații, și lovituri periodice, conform GE-026-97 [13] \*\*\*.

Acest tip de maiuri au productivitate redusă și se utilizează la compactarea unor volume mici sau în spații înguste.

Ar fi de menționat și faptul că compactarea prin vibrații, cât și compactarea statică, prin folosirea unor cilindri metalici prevăzuți cu proeminente pe suprafața tamburilor, duce la apariția fenomenului de frământare care introduce pe lângă forțele de compresiune și forțe de forfecare, ce contribuie la învingerea forțelor interne de coeziune.

Conform analizei caracteristicilor tehnice ale compactoarelor vibratoare produse atât în țară, cât și pe plan internațional, deosebim câteva clase constructive, în principal, după tehnologia de lucru și natura terenului, și anume [46]:

- a) compactoare vibratoare tractate;
- b) compactoare vibratoare autopropulsate, cu șasiu monobloc (nearticulat) și două rulouri netede. Vibrarea se efectuează fie cu un singur rulou, fie pe ambele rulouri, iar tracțiunea se efectuează fie cu un singur rulou sau totală, pe ambele rulouri;

c) compactoare vibratoare autopropulsate cu două rulouri profilate cu șasiu articulată. Astfel, vibrarea se efectuează pe ambele rulouri sau numai pe unul singur, iar tracțiunea se efectuează pe ambele rulouri;

d) compactoare vibratoare autopropulsate cu două rulouri netede și șasiu articulată. Vibrarea se efectuează fie cu un singur rulou, fie pe ambele rulouri, iar tracțiunea se efectuează pe un singur rulou sau pe ambele rulouri;

e) compactoare vibratoare autopropulsate mixte cu șasiu articulată. Vibrarea se efectuează cu un rulou amplasat în față, iar tracțiunea se efectuează pe două sau patru pneuri plasate în spate. Sunt folosite și sisteme cu tracțiune totală simultan pe rulou și pneuri.

Așadar, în paragrafele ce urmează vor fi prezentate detaliat informații cu privire la orice tip de compactor autopropulsat (cu un rulou vibrator și cu două rulouri vibratoare).

## **2.2. Compactoare autopropulsate cu un singur rulou vibrator**

Elementele constructive principale care se exprimă în funcționalitatea unui compactor vibrator le putem observa în subansamble vitale cum ar fi: sistemul de vibrare, sistemul de deplasare, sistemul de izolare și amortizare a vibrațiilor, sistemul de acționare și structura metalică [44, 46].

Soluția constructivă a sistemului de vibrare pentru compactoarele vibratoare se adoptă în funcție de tehnologia de compactare și de modalitatea de alcătuire a mașinii. Așadar, în mod frecvent se folosesc numai vibratoare inerțiale cu forță unidirecțională sau rotitoare. În același mod, pentru procesarea unei anumite soluții de vibrator trebuie să se țină cont de posibilitățile de acționare ale acestuia.

Sistemul de vibrare cu forțe rotitoare este compus din axul ruloului, pe care se află amplasate simetric față de planul median și



în fază mase excentrice, rezemarea în flanșele laterale ale ruloului și sistemul de acționare.

O altă formă constructivă a sistemului de vibrație, frecvent folosită la compactoarele autopropulsate cu șasiu monobloc și cu ambele rulouri vibratoare de tip „duplex”, este cu axul excentric pe toată lungimea.

Soluțiile constructive enumerate anterior impun ca sistemul de rezemare prin lagăre cu rulmenți să fie executat cât mai precis, iar rulmenții trebuie să asigure durabilitatea corespunzătoare la forțele dinamice pe care le transmite de la ax la mantaua ruloului compactor.

Sistemul de vibrație cu forță unidirecțională este aplicat în două variante constructive, și anume: cu vibrator inerțial cu două mase excentrice montate în fază, sincronizate cinematic și cu vibrator pendular montat pe axul ruloului.

Astfel, prima categorie de vibratoare care sunt utilizate în mod frecvent se remarcă prin faptul că pentru turații relativ mari de funcționare (2400-3000 rot./min.) este necesar să se efectueze calculul de încălzire, după cum și măsurile ce se impun pentru o execuție precisă a lagărelor cu rulmenți și a sistemului de ungere în vederea realizării unui schimb de căldură corespunzător. Pentru forțe mari și frecvențe de lucru relativ mici (12-15Hz) este obligatoriu un moment static mare. Așadar, se impune un calcul special la pornire astfel, încât sistemul vibrator să intre în regim stabilizat.

Vibratoarele pendulare sunt compuse dintr-o carcasă prinsă articulată, prin intermediul unor brațe, la axul ruloului. În interiorul carcasei se află montat un vibrator inerțial cu mase excentrice sau corpuri de rostogolire care generează numai forță rotitoare. Datorită prinderii pendulare a vibratorului, forța rotitoare se transmite axului ruloului numai sub formă de forță perturbatoare unidirecțională pe verticală.

Se accentuează că soluțiile tehnice, care sunt bazate pe antrenarea corpurilor de rostogolire în generarea vibrațiilor, au

avantaje certe în privința durabilității rulmenților rotorului, tot astfel cum și posibilitatea de modificare a forței perturbatoare la aceeași valoare a frecvenței vibrațiilor.

Soluția este utilizabilă în condițiile unei execuții precise și a unor forțe relativ reduse (2000-4000 daN) la turații maxime de până la 2400-2800 rot./min. La momentul când se depășesc aceste valori, se impun măsuri speciale de evacuare a căldurii generate prin frecare.

Sistemul de deplasare a compactorului este compus din organele de rulare (unul sau ambele rulouri metalice, roțile cu pneuri) acționate preponderent hidrostatic.

Pentru a efectua parametrii optimi de compactare, este indispensabil, pe de o parte, obținerea parametrilor de vibrație la valorile impuse, iar pe de altă parte, micșorarea vibrațiilor în vederea obținerii parametrilor ergonomici la locul de comandă și a unui nivel corespunzător la subsamblele funcționale. Sistemul de izolare și amortizare a vibrațiilor, fundamental, se constituie dintr-o singură treaptă elastică cu proprietăți de amortizare sau din două trepte, astfel de soluție fiind folosită cu rezultate foarte bune la noi în țară. Părțile componente principale ale sistemului de izolare și amortizare a vibrațiilor sunt reprezentate prin elemente antivibratile din cauciuc. Deci, treptele de izolare a vibrațiilor sunt plasate între rulourile vibratoare și șasiul utilajului. Un exemplu de sistem antivibratil are dispuse elementele din cauciuc în așa mod, încât acestea să fie solicitate la compresiune și forfecare, fiind în permanență precomprimate, acțiune ce le conferă o durabilitate ridicată în exploatare. Cu ajutorul proprietăților elastice, caracterizate de coeficientul de rigiditate, elementele din cauciuc determină regimul dinamic de funcționare a mașinii. Dacă elementele antivibratile nu sunt amplasate rațional în structura mașinii, poate apărea o funcționare anormală a mașinii însoțită de distrugerea în timp scurt a subsansamblelor, precum și transmiterea vibrațiilor la postul de comandă [44].

Întrucât funcționarea are loc pentru un regim determinat, de obicei diferit de rezonanță, ce îndeplinește cerințele atingerii parametrilor funcționali, ergonomici și tehnologici, elementele din cauciuc îndeplinesc rolul de izolatoare antivibratile, având la bază proprietatea de elasticitate a cauciucului. Deci, capacitatea cauciucului de a absorbi o bună parte din energia mecanică face ca amplitudinea vibrațiilor să fie micșorată, adesea la trecerea prin rezonanță, caz în care elementele din cauciuc au sarcina de amortizoare ca urmare a proprietății de disipare a energiei.

Construcția metalică este formată din părțile componente ale șasiului, suportul grupului de acționare, cutia de lestarsă, capotajele aferente și cabina. Se observă ca tendință generală că elementele constructive sunt executate cât mai rigid și compact astfel, încât să nu se deformeze în condițiile regimului de vibrații impus. Construcția șasiului se compune din două părți care sunt legate între ele printr-o articulație dublă cu ax vertical și orizontal.

Pentru crearea condițiilor favorabile amortizării vibrațiilor și sistemului de tracțiune, articulația poate fi îndeplinită și cu elemente elastice din cauciuc înglobate. Soluția dată a condus atât la îmbunătățirea parametrilor ergonomici ce țin de vibrațiile transmise la postul de comandă, cât și a parametrilor de tracțiune la demararea utilajului.

Conform rezultatelor experimentale, a analizei sistemelor de acționare utilizate pe plan internațional se poate argumenta că numai acționarea hidrostatică răspunde favorabil la toate cerințele impuse funcționării unei mașini de compactat prin vibrație.

Energia necesară consumatorilor pentru deplasare și vibrație este furnizată de motorul termic prin intermediul sistemului hidrostatic compus dintr-o pompă cu pistoane axiale (reglabilă) și motoare hidrostatice pentru deplasare și vibrație.

Pentru deplasare se folosesc, de obicei, sisteme hidrostatice cu circuit închis care are următoarele avantaje:

- comandă lentă și progresivă în ambele sensuri de deplasare (înainte/înapoi);

- posibilitatea măririi turației pompei cu implicații favorabile asupra cantității mai scăzute de ulei vehiculat în circuit;
- frânare fără pierderi în circuit;
- dimensionarea mai economică a conductelor circuitului de forță.

Sistemul de vibrare este acționat cu motoare cu roți dințate a căror turație este modificată în funcție de debitul livrat de pompă.

Cu privire la necesitatea de reglare cât mai fină a parametrilor sau pentru menținerea lor la anumite valori, sistemul hidrostatic de comandă este dotat cu dispozitive servo-comandă de construcție specială. Pe lângă pompa principală care furnizează uleiul sub presiune pentru întreg circuitul mai există și o pompă auxiliară care trebuie să îndeplinească următoarele funcții: completează uleiul pierdut din circuitul închis și alimentează cu ulei circuitul de comandă. Pe lângă circuitul principal, de forță, instalația mai are în componență și câte un circuit de răcire compus dintr-un răcitor de ulei și un rezervor de ulei, care servește ca vas tampon capabil să preia variațiile de volum datorită variațiilor de temperatură. În alte variante de acționare este utilizată o pompă dublă, una din unități pentru rularea utilajului, iar cealaltă pentru acționarea vibratorului.

Cu ajutorul *compactoarelor autopropulsate* cu un singur rulou vibrator putem efectua compactarea unei game variate de pământ. Unele dintre cele mai reprezentative exemple constructive de rulouri vibratoare sunt reprezentate în figura 2.2.

Pentru compactoarele cu rulou vibrator profilat, dimensiunile proeminențelor (cramponelor) sunt corelate cu tipul de pământ ce trebuie compactat. Astfel, pentru pământurile argiloase suprafața laterală a unui crampon trebuie să fie de 30-40 cm<sup>2</sup>, iar pentru nisipuri de 40-65 cm<sup>2</sup> [44, 46].



a)



b)

**Fig. 2.2. Utilaje de compactare autopropulsate cu un singur rulou vibrator [1]\*\*\*: rulou vibrator neted; b) rulou vibrator profilat (cu crampoane).**

Compactarea prin vibrație are specific un parametru numit coeficientul de vibroîndesare care este influențat de compoziția granulometrică și de umiditate, îndesarea maximă obținându-se când umiditatea are valoarea  $W=(1-1,2) \times W_{opt}$ . La umiditatea egală cu  $0,7W$  eficacitatea compactării prin vibrație este redusă. Astfel, efectul compactării prin vibrație scade odată cu creșterea conținutului de argilă grea.

### 2.3. Compactoare cu două ruloari vibratoare

Cilindrii compactori vibrator tandem, reprezentați în figura 2.3, sunt larg utilizați la toate tipurile de lucrări și în special la cele de punere în operă a amestecurilor asfaltice, unde execută o mare productivitate și o bună calitate a lucrărilor îndeplinite [46].



a)



b)



**Fig. 2.3. Utilaje de compactare cu două rulouri vibratoare:**  
**a) modelul Caterpillar; b) modelul Bomag; c) modelul Ammann;**  
**d) modelul Hamm [1, 2, 3, 4 ]\*\*\***

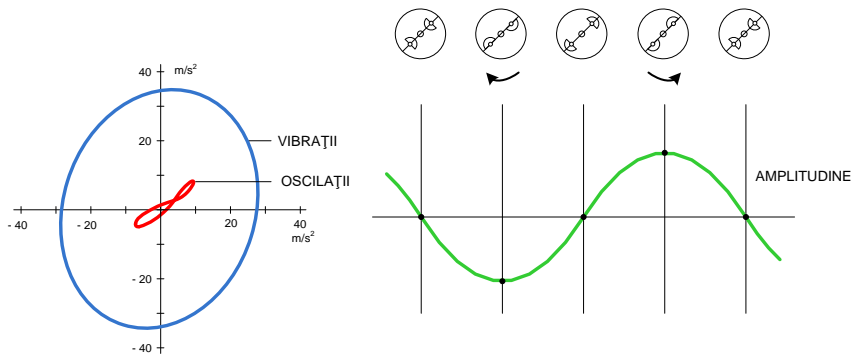
Tipurile date de utilaje sunt dotate cu ambele rulouri vibratoare cu posibilitatea modificării frecvenței vibrațiilor în dependență de tipul terenului ce necesită compactarea.

Astfel, soluțiile constructive sunt corelate la nivelul tehnologiei de vârf și se caracterizează prin următoarele [44, 46]:

- integrală hidrostatică, în circuit închis, cu turație variabilă continuă;
- vibrații acționate hidrostatic în circuit închis, integral față-spate, cu trei trepte de amplitudine și două trepte de frecvență;
- control automat al frecvenței, vitezei de deplasare, comenzii vibratorului și determinării efectului de compactare (de exemplu, sistemul inteligent de monitorizare a gradului de compactare Variocontrol, sistemul de conducere a procesului de compactare „Asfalt Manager”, cu control în regim real de timp și cu poziționare GPS, aplicații ale companiei Bomag);
- șasiu articulat, direcție hidrostatică integrală față-spate;
- echipament și dotări auxiliare: rulou față secționat (compus din două semirulouri), echipat cu postcomandă rotativ, cu dispozitiv de tăiere-teșire a marginilor și cu deplasare pe direcție transversală pe axa principală a mașinii [46].

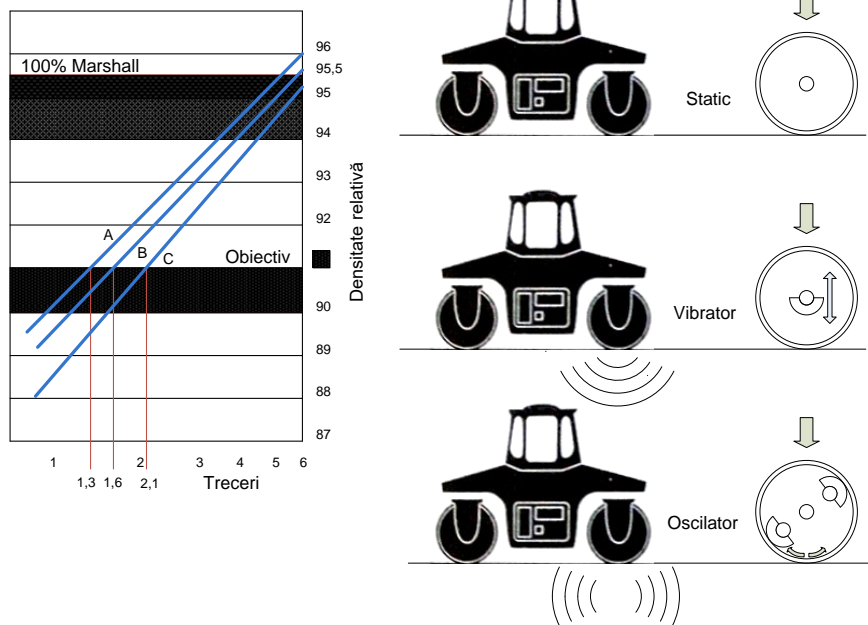
Vibrogeneratoarele concepute și construite de firma Hamm generează oscilații pe orizontală, care determină o alură a diagramei accelerației din figura 2.4, îmbunătățind considerabil efectul de compactare reprezentată în figura 2.5 față de cazul vibrații [27, 46].

Astfel de oscilații sunt generate de oscilația cilindrului în raport cu axa de rotație. Avantajul major al acestor tipuri de echipamente este acela că pot fi folosite în sectoare de lucru unde vibrațiile pe verticală sunt dăunătoare, cum ar fi compactarea în vecinătatea unor construcții sensibile, pe poduri etc.



**Fig. 2.4. Oscilațiile produse de vibrogeneratoarele concepute de firma Hamm [27]**

Pentru astfel de echipamente tehnologice pentru compactare prin vibrații, cea mai importantă problemă impusă de inginerul specializat în acționări hidraulice este asigurarea parametrilor doriți pentru căpătarea unui anumit regim de vibrații tehnologice care să admită desfășurarea unei lucrări la care regimul de vibrații să asigure condițiile tehnologice necesare procesului de compactare a pământurilor [28, 29, 44, 46].



**Fig. 2.5. Influența oscilațiilor asupra efectului de compactare [27]**

În primele soluții de acționare sunt folosite vibratoarele de mică putere des întâlnite cu acționări pompe cu cilindrul fixă, cu reglarea regimurilor de lucru cu reglatoare de debit rezistive și amplitudinea forțelor perturbatoare în intervalul 30-100 kN cu frecvențe în intervalul 30-60 Hz.

Cea mai simplă soluție folosită efectiv pe rulouri compactoare este metoda fără nici un reglaj concret de debit sau cu reglare rezistivă a debitului pe distribuitorul de cuplare a vibratorului [46].

O asemenea schemă de acționare este reprezentată în figura 2.6 pentru un compactor cu forță perturbatoare de 45 kN și frecvența de 60 Hz.

În această variantă de concepție a acționării este important de evidențiat că principala cerință a sistemului de acționare este



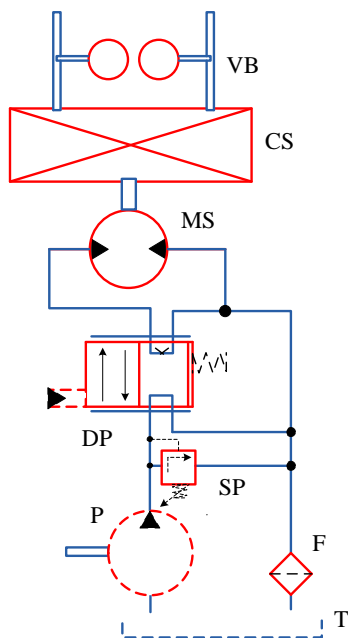
producerea vibrațiilor unidirecționale și mai puțin caracteristicile vibrațiilor generate.

Componența schemei este următoarea: P - pompa cu cilindree fixă aleasă în așa mod, încât să refuleze un debit care să asigure vibratorului o frecvență între 50-60 Hz; DP - distribuitor proporțional cu comandă hidraulică proporțională 4/2; MS - motor hidraulic rotativ al vibratorului; VB - vibratorul propriu-zis; SP - supapa de protecție a circuitului vibratorului; F— filtru; T - tanc.

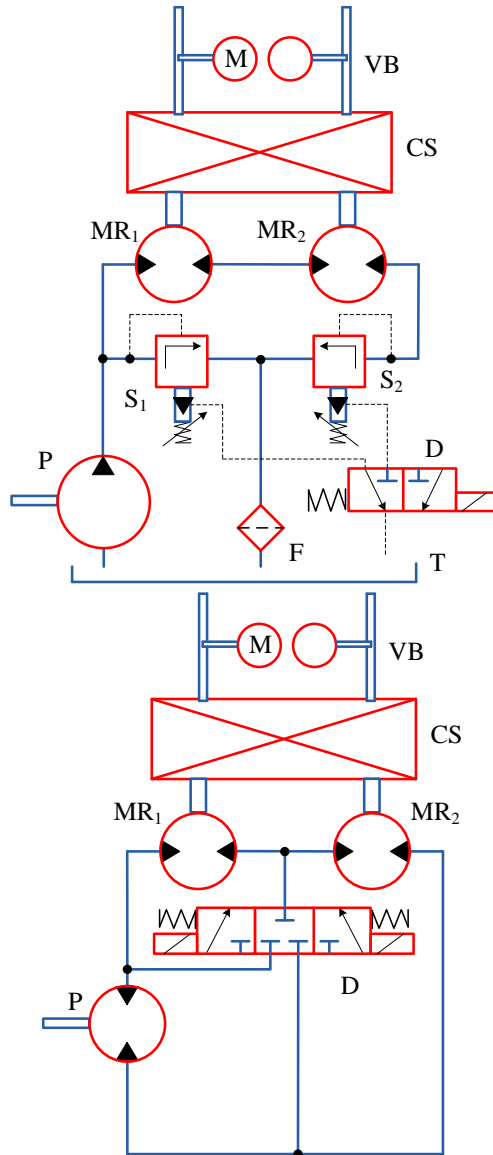
Astfel de sistem este foarte bun pentru cazurile de lucru cu regim constant și nu este recomandat acționărilor la care se cere un regim de vibrații variabil, în frecvență sau forță perturbatoare. Dezavantajul sistemului constă în faptul că dacă se realizează reglarea debitului (și implicit a frecvenței), în mod automat se modifică și forța perturbatoare datorită principiului inerțial de generare a forței vibratorului (forța proporțională cu pătratul vitezei unghiulare).

Pentru utilajele vibratoare la care este nevoie de variația frecvenței de vibrare, respectiv obținerea unei anumite forțe perturbatoare, se folosesc schemele de acționare cu reglarea presiunii din circuit sau cu selectarea motorului ca în figura 2.7.

Observăm în schema din figura 2.7 că se utilizează pentru compactoarele vibratoare cu masa mai mică de 2000 kg. Pentru reglarea frecvenței de vibrare, independent de forța de vibrare, se folosesc două supape pilotate hidraulic S1 și S2 care limitează presiunea din sistem la două valori  $p_1$  și  $p_2$ , în funcție de comanda realizată pe distribuitorul D comandat electric. În acest mod, se realizează două regimuri de vibrații caracterizate fiecare de o anumită frecvență și o anumită forță perturbatoare [44, 46].



**Fig. 2.6. Acțiunea vibratorului fără reglarea frecvenței vibrațiilor**



**Fig. 2.7. Acțiunea vibratorului cu reglarea frecvenței vibrațiilor și a nivelului forței perturbatoare**

În această variantă se folosesc atât pompe, cât și motoare cu roți dințate ce satisfac cu succes condițiile de exploatare ale utilajului. Constatăm că această schemă de acționare este realizată în circuit închis, iar cele două motoare ale vibratorului  $MR_1$  și  $MR_2$  sunt alimentate în serie cu posibilitatea selectării acestora prin distribuitorul D și astfel se alege regimul de lucru al vibratorului. În astfel de soluții, acționarea se utilizează pentru pompa vibratorului pompe cu pistoane axiale și cilindree variabilă din categoria pompelor cu disc înclinat și reglarea cilindrului comandată electric, EZ sau EP (pompe A4VG sau A10VG). Motoarele sunt tot cu pistoane axiale, disc înclinat și cilindree fixă din categoria A4FM sau A10FM.

#### **2.4. Caracteristici dinamice privind compactoarele vibratoare**

În continuare vor fi prezentați succint parametrii principali tehnologici ce influențează asupra caracteristicilor dinamice și de vibrații ale utilajelor de compactare prin vibrație.

a) Frecvența vibrațiilor este factorul primar ce se stabilește atât în tehnologia de compactare, cât și în funcție de implicațiile funcționale și constructive ale utilajului. Cercetările efectuate [30, 31, 32, 33, 46] în condițiile compactării diferitelor materiale arată că fiecărui sistem, alcătuit din particule fine de minerale argiloase, hidroxizi de fier și aluminiu, silice coloidală, îi corespunde o frecvență proprie la care se obține cel mai ridicat efect de compactare.

În tabelul 2.1 sunt prezentate valorile recomandate ale frecvenței vibrațiilor în dependență de natura terenului.

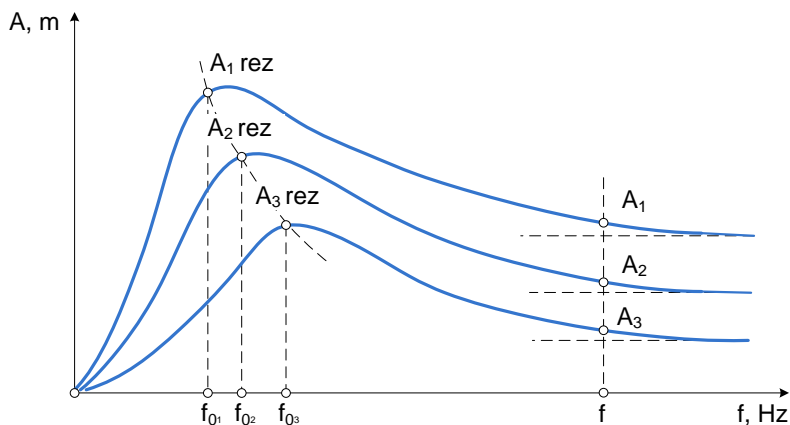
**Tabelul 2.1. Valorile recomandate pentru frecvența vibrațiilor la utilajele de compactat [27]**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Natura terenului</i>	<i>Frecvența vibrațiilor, în Hz</i>
1	Pământuri necoezive	25 ~ 35
2	Pământuri coezive	20 ~ 30
3	Mixturi asfaltice	35 ~ 50
4	Beton proaspăt	45 ~ 70

Regimul vibrațiilor tehnologice este caracterizat prin trepte dinamice stabile cu funcționarea rulourilor vibratoare în postrezonanță reprezentată în figura 2.8, astfel încât:

$$\frac{f}{f_{0j}} = 3 \dots 6, \text{ iar } A_j = \frac{(m_0 r)_j}{m_1}, j = 1, 2, \dots,$$

unde:  $f_{0j}$  este frecvența de rezonanță;  $f$  - frecvența de excitație, iar  $(m_0 r)_j$  este momentul static al vibratorului pe treapta  $j$  de funcționare, care generează amplitudinea stabilă  $A_j$  pentru ruloul vibrator cu masă  $m_1$ .



**Fig. 2.8. Regimul vibrațiilor tehnologice [44, 46]**

Compania Bomag recomandă utilizarea echipamentelor de compactare a asfaltului, dacă se folosesc utilaje ușoare, ca masa acestora să fie de 50-3000 kg și amplitudini cuprinse între 0,4-60 mm la frecvențe cuprinse în intervalul 10-80 Hz.

b) Un factor care influențează asupra adâncimii de compactare este amplitudinea vibrațiilor. Astfel, pentru diferite categorii de pământ se recomandă valorile din în tabelul 2.2 [46].

**Tabelul 2.2. Valorile recomandate pentru amplitudinea vibrațiilor de lucru la compactoare**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Natura terenului</i>	<i>Amplitudinea vibrațiilor, în mm</i>
1	Pământuri necoezive	0,3 ~ 0,8
2	Pământuri coezive	1,5 ~ 5,0
3	Mixturi asfaltice (la cald)	0,25 ~ 0,40
4	Straturi de rezistență stabilizate cu bitum	0,50 ~ 0,65
5	Straturi de rezistență stabilizate cu ciment	0,30 ~ 0,60

c) Accelerația vibrațiilor. Pentru vibrații armonice, accelerația maximă a organului de compactare, dată de relația  $A\omega^2$ , are o influență decisivă asupra modificării porozității. Așadar, dacă se modifică amplitudinea și pulsația vibrațiilor așa încât accelerația să se mențină constantă, se obține aceeași porozitate la aceeași durată de vibrare. Aceasta arată că indiferent de valoarea separată pentru amplitudine sau frecvență, gradul de porozitate scade odată cu creșterea accelerației sau a raportului  $\Gamma = A\omega^2/g$  [46].

În figura 2.9 este ilustrată variația porozității în funcție de raportul accelerațiilor  $\Gamma = A\omega^2/g$  pentru trei pământuri de aceeași natură, dar cu granulometrii diferite. Constatăm că de la valoarea  $\Gamma = 5 \dots 7$  în sus, gradul de porozitate se menține constant. Prin urmare, în vederea unei proiectări raționale se recomandă ca raportul  $\Gamma \in 5 \dots 7$  [44, 46].

d) Forța perturbatoare reprezintă factorul dinamic fundamental pentru utilajul de compactare prin vibrație, fiindcă pe de o parte aceasta caracterizează mărimea amplitudinii, iar pe de altă parte, presiunea dinamică în teren și regimul de compactare (vibrații sau vibropercuții) la zona de contact dintre ruloul vibratoare și mediul de compactat.

Din experimente s-a constatat că pentru a se obține rezultate eficiente la compactare trebuie ca raportul dintre amplitudinea forței perturbatoare  $F_0$  și greutatea  $Q$  ce revine ruloului vibratoare să fie cuprins între anumite limite. Acest aspect este considerat încă de la proiectare, dar trebuie ținut cont de el și în exploatare. Așadar, dacă raportul  $F_0/Q < 1$ , efectul de compactare este redus, procesul de compactare fiind neeficient, iar dacă  $F_0/Q \leq 2$ , atunci sistemul lucrează cu vibrolovituri asupra mediului de compactat. Pentru nisipuri este recomandat a se folosi raportul  $F_0/Q \leq 2$ , iar dacă raportul ajunge la valoarea  $F_0/Q \geq 3$ , atunci utilajul se înfundă în teren. În general, pentru pământurile argiloase cu un conținut mic de nisip se recomandă ca  $F_0/Q = 4 \dots 6$ .

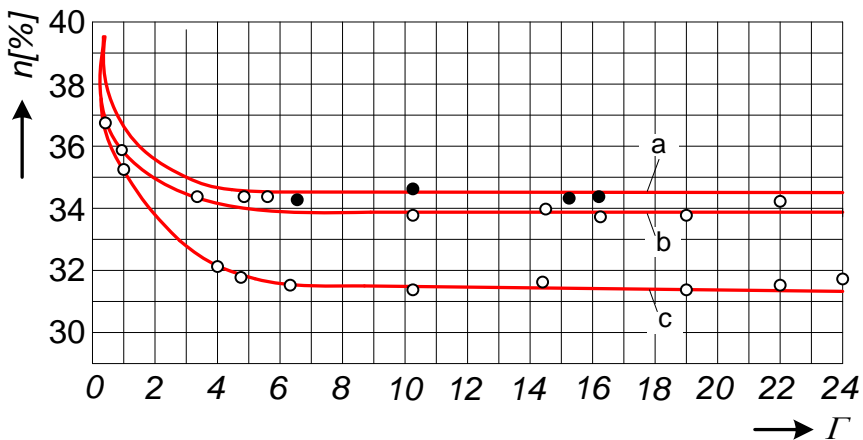


Fig. 2.9. Variația porozității în funcție de raportul accelerațiilor corelat cu granulozitatea pământului a, b, c [34]

e) Viteza de deplasare și numărul de treceri constituie parametrii tehnologici cu ponderea cea mai mare în determinarea productivității. Parametrii dați sunt stabiliți în funcție de natura materialului de compactat, tipul utilajului și gradul de compactare. În acest mod, pentru utilajele cu un singur rulou vibrator este recomandată utilizarea unei viteze de lucru cuprinsă în intervalul 1,2-3 km/h, iar pentru utilajele cu ambele ruloare vibratoare viteza este cuprinsă în intervalul de 3-6 km/h. Pentru terenuri argiloase cu un procentaj mare de nisip (65%) sau balast cu nisip (70%) și o umiditate medie de 12% se poate aplica cu rezultate bune formula empirică [46]:

$$v = 0,2\sqrt{f} \text{ [km/h]}, \quad (2.1)$$

unde  $f$  este frecvența vibrațiilor, în Hz.

În cazul în care se efectuează deplasarea cu o viteză mai mare, atunci va trebui mărit numărul de treceri pe același strat, fiindcă vibrațiile de lucru se transmit într-un timp mai scurt, procesul de compactare fiind mai scăzut.

Pentru realizarea parametrilor vibrațiilor de lucru ale ruloarelor vibratoare este necesară obținerea următorilor parametri funcționali: momentul static al maselor excentrice, turația de acționare a vibratorului, puterea de acționare a vibratorului. Pentru viteza de deplasare este necesar să se realizeze turația ruloului de tracțiune (sau a roților cu pneuri) la un diametru și o putere de acționare date. În cazul acționării hidrostatice este necesar a se preciza valorile minime și maxime ale parametrilor hidrostatici (presiune, debit, temperatură) în diversele puncte ale circuitelor de forță și comandă.

*Momentul static al maselor excentrice.* Sistemul de generare a vibrațiilor constituie caracteristica fundamentală funcțională a vibroexcitatorului inerțial ce caracterizează mărimea forței perturbatoare și a amplitudinii deplasării ruloului vibrator [44, 46].

*Turația organelor de deplasare și tracțiune* este caracterizată direct de debitul livrat de pompă și capacitatea specifică (cilindreea) a motorului hidrostatic. E de menționat că viteza de deplasare a



utilajului este alterată de alunecarea organelor de deplasare pe teren ce trebuie compensată printr-un spor de turații [44, 46].

*Turația maselor excentrice* se execută fie pe cale mecanică (la utilajele vechi care au transmisii cu lanțuri, curele, axe), fie hidrostatic (la utilajele moderne). Parametrul funcțional dat determină forța perturbatoare și frecvența vibrațiilor de lucru [44, 46].

*Forța de tracțiune* reprezintă una dintre caracteristicile funcționale de trecere, reflectând influența greutateii mașinii și a rezistențelor la înaintare. Totuși, forța de tracțiune constituie un indicator privind modul de efectuare a parametrilor tehnici și menținerea acestora în timpul exploatării la toate subsansamblele componente ale sistemului de deplasare. Pentru mărirea capacității de trecere prin forța de tracțiune ridicată, compactoarele moderne sunt concepute cu tracțiune totală pe ambele axe (față/spate) ale mașinii [46].

Pentru realizarea unui proces de compactare corespunzător este indicat să ținem cont de câteva corelații între următorii parametri tehnologici, constructivi și funcționali ai echipamentelor de compactat:

**a) Efortul unitar de compresiune în procesul de compactare.** În cazul compactării prin acțiune statică, efortul unitar maxim se determină prin relația:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{qE_{st}}{R}} \leq 0.9\sigma_r, \quad (2.2)$$

unde:  $q$  - încărcarea specifică liniară a ruloului;

$E_{st}$  - modulul de deformare a pământului;

$R$  - raza ruloului;

$\sigma_r$  - rezistența la rupere a stratului de compactat.

Încărcarea specifică liniară a ruloului se calculează prin relația:

$$q = \frac{Q}{B}, \quad (2.3)$$

unde  $Q$  reprezintă greutatea mașinii de compactat care se repartizează pe rulou;

$B$  - lungimea ruloului compactor.

În cazul compactării cu acțiune dinamică, efortul unitar maxim de compresiune are următoarea relație de calcul:

$$\sigma_{max}^* = \sqrt{\frac{q_d E_d}{R}} \leq 0.9\sigma_r, \quad (2.4)$$

unde:

$$q_d = \frac{k_d(F_0 + Q)}{B}, \quad (2.5)$$

unde:  $F_0$  reprezintă amplitudinea forței perturbatoare a ruloului;

$k_d$  - coeficientul dinamic de amplificare (pentru asfalt  $k_d=0,68...0,75$ );

$E_d$  - modulul dinamic de deformare a pământului.

Dacă rulourile sunt profilate (cu cramioane), atunci relația de calcul pentru efortul unitar de compresiune are următorul aspect:

$$\sigma_{max} = \frac{Q}{n_{cr} A_{cr}} \leq 0.9\sigma_r, \quad (2.6)$$

unde:  $n_{cr}$  - numărul cramioanelor pe un singur șir;

$A_{cr}$  - aria de contact dintre un crampon și materialul compactat.

Dacă utilajul de compactat este dotat cu pneuri, atunci efortul maxim de compactare se determină prin relația:

$$\sigma_{max} = \frac{Q_1}{A_c} \leq 0.9\sigma_r, \quad (2.7)$$

unde:  $Q_1$  - greutatea mașinii care se repartizează unui pneu;

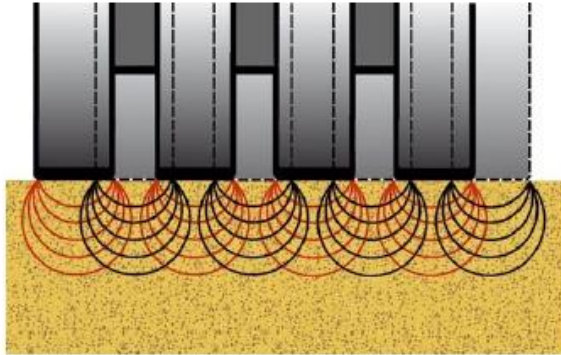
$A_c$  - aria de contact dintre pneu și teren:

$$A_c = 1.1 \frac{\xi Q_1}{p}, \quad (2.8)$$

unde:  $\xi$  - coeficientul de rigiditate al pneului;

$p$  - presiunea din pneu.

În figura 2.10 sunt reprezentate distribuțiile efortului de compresiune sub pneurile unui compactor în timpul desfășurării procesului de lucru.



**Fig. 2.10. Distribuția pe adâncime a efortului de compresiune sub pneurile compactorului**

***b) Adâncimea de compactare***

Parametrul dat este în strânsă dependență de valoarea umidității optime de compactare,  $w_0$ , a terenului, determinată cu ajutorul metodei Proctor pentru fiecare tip de teren în parte.

Adâncimea zonei active de compactare  $H_0$ , se poate determina pe baza următoarelor relații care iau în calcul modulele globale de deformație ale terenurilor de compactare, astfel:

- pentru ruloul metalic neted:

$$H_0 = 0.30 \frac{w}{w_0} \sqrt{qR}, \text{ pentru pământurile coezive;} \quad (2.9)$$

$$H_0 = 0.35 \frac{w}{w_0} \sqrt{qR}, \text{ pentru pământurile necoezive;} \quad (2.10)$$

- pentru ruloul metalic cu crampoane:

$$H_0 = (1 - k_a) [H_{cr} + (2.5 \div 4) a_{cr}], \quad (2.11)$$

- pentru roțile cu pneuri:

$$H_0 = 0.18 \frac{w}{w_0} \sqrt{Q_1 p \xi}, \quad (2.12)$$

unde:  $w$  este umiditatea efectivă a terenului [%];  $k_a$  - 0.15 ÷ 0.35 este coeficientul de afânare al terenului;  $H_{cr}$  – înălțimea activă a cramponului;  $a_{cr}$  – latura mică a suprafeței cramponului.

### c) Numărul de treceri

Pentru realizarea unei mai bune compactări, utilajul trebuie să treacă de mai multe ori peste același strat până se obține gradul de compactare optim. În cazul în care compactorul are rulouri cu cramioane, numărul de treceri se calculează prin relația:

$$n = 1.3 \frac{A_r}{n_{crt} A_c}, \quad (2.13)$$

unde:  $A_r$  reprezintă aria ruloului;  $A_c$  – aria de contact dintre rulou și teren;  $n_{crt}$  – numărul total de cramioane al ruloului.

### d) Încărcarea specifică liniară

Pentru a evita apariția fenomenului de înfundare a rulourilor metalice netede în materialul de compactat a fost introdus parametrul  $q = Q/B$  denumit încărcare specifică liniară. Acesta exprimă încărcarea totală normală  $Q$  la suprafața de rulare ce revine unui singur rulou cu lungimea de lucru  $B$  a ruloului.

A apărut necesitatea de a evalua cât mai precis influența terenului asupra parametrilor vibrațiilor mașinii, s-a impus adoptarea mai multor modele mecanice de studiu pentru pământuri. Astfel, modelele cunoscute iau în considerație principalele proprietăți ale pământurilor ca plasticitatea, elasticitatea, histeretică, amortizarea vâscoasă și frecarea uscată. Ca rezultat, au fost studiate și elaborate mai multe modele pentru compactarea pământurilor cum ar fi: Voigt-Kelvin, Maxwell, Bathelt, Dvorak-Peter, Ephremides, Hartman. Acestea sunt modele compuse mixte pe baza

următoarelor modele simple: Newton, Hooke, Saint-Venant și Bathelt.

Luând în considerare că presiunea efectivă de lucru pe teren la mașinile din această categorie este de max. 1,5 daN/cm<sup>2</sup> (pentru a se evita înfundarea în material) și o amplitudine relativ mică de ordinul (0,25...1,5) mm pentru vibrațiile de lucru, pe baza rezultatelor experimentale din modelele menționate se constată că cea mai importantă pondere are proprietatea de elasticitate. Astfel, se ține seama numai de deformațiile elastice reversibile și se poate scrie:

$$k = C_z A_c, \quad (2.14)$$

unde:  $k$  este coeficientul de rigiditate al terenului corespunzător ariei suprafeței de contact;

$C_z$  - coeficientul de contracție elastică uniformă corespunzător suprafeței de contact.

Suprafața de contact este asimilată ca pentru o placă dreptunghiulară care se calculează prin relația:

$$C_z = x_z \frac{E}{(1 - \nu^2) \sqrt{A_c}}, \quad (2.15)$$

unde:  $x_z$  este coeficientul de formă al plăcii;

$E$  - modulul de elasticitate a pământului;  $\nu$  - coeficientul lui Poisson.

Coeficientul de rigiditate  $k^*$ , determinat pe cale experimentală, corespunzător unei suprafețe dreptunghiulare de contact (placă dreptunghiulară de probă) cu aria  $A_c^*$ , va avea expresia:

$$k^* = x_z E \sqrt{A_c^*} / (1 - \nu^2) \quad (2.16)$$

iar coeficientul de rigiditate  $k$  corespunzător unei suprafețe reale de contact (în cazul unui anumit fel de utilaj) cu aria  $A_c$ , va fi:

$$k = x_z E \sqrt{A_c} / (1 - \nu^2) \quad (2.17)$$

Din relațiile (2.16) și (2.17) rezultă valoarea lui  $k$  în funcție de coeficientul de rigiditate  $k^*$  determinat experimental:

$$k = k^* \sqrt{A_c / A_c^*} \quad (2.18)$$

În tabelul 2.3 se dau valorile lui  $k^*$  pentru câteva categorii de teren.

**Tabelul 2.3. Valorile coeficientului de rigiditate  $k^*$  pentru pământuri determinate experimental cu placa de probă cu suprafața  $A_c^* = 4500 \text{ cm}^2$**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Natura stratului de pământ</i>	<i>Coeficientul de rigiditate <math>k^*</math>, în MN/m</i>
1	Pământ nisipos, afânat Pietriș (3~7) mm cu nisip	44,0
2	Nisip fin argilos, afânat. Pietriș (7~15) mm cu nisip argilos	67,5
3	Nisip cu granulație medie și ușor argilos, afânat	90,0
4	Nisip cu granulație medie până la mare	95,6
5	Pietriș (7~15) mm cu pământ precompactat Argilă cu pietriș compactată	120,0

Luând în considerare toate aspectele descrise anterior, se poate face o corelare multicriterială pe baza informațiilor referitoare la tipul pământului, utilajul de compactat și caracteristicile operaționale ale acestuia, conform tabelului 2.4. Indicativ GE-026-97.

În cazul când sarcina este aplicată pe sol, zona de contact dintre pneu și sol este de aproximativ un cerc. Boussinesq a dezvoltat o teorie care presupune solul ca un material elastic și a aproximat valorile teoretice ale forțelor de apăsare distribuite sub un rulu.

La fel, pe baza relațiilor teoretice ale lui Boussinesq, după cum și a datelor experimentale *in situ* ale autorilor Peurifoy și Ledbetter [35], s-a stabilit legătura dintre tipul terenului și soluția constructivă a echipamentului inserate în tabelul 2.5 pentru compactarea acestuia.

**Tabelul 2.4. Corelații multicriteriale între teren–utilaj de compactare [13]\*\***

<b><i>Tip pământ</i></b>	<b><i>Utilaj de compactare</i></b>	<b><i>Grosimea stratului, m</i></b>	<b><i>Numărul de treceri</i></b>	<b><i>Viteza de lucru, km/h</i></b>	<b><i>Productivitatea m<sup>3</sup>/h</i></b>
Blocuri din piatră, anrocamente, bolovani	Rulouri vibratoare grele (6-10 t)	1 - 2	4 - 6	1,5 - 2,5	300 - 800
	Placă vibratoare grea (2)	0,5 - 1	4 - 6	0 - 5	50 - 100
	Compactoare pe pneuri (40-50 t)	0,6 - 1	2 - 6	2 - 3	250 - 600
	Maiuri și plăci bătătoare grele	0,5	4	-	60 - 80
	Rulouri vibratoare grele	0,5 - 0,6	3 - 4	1,5 - 2,5	250 - 750
	Placă vibratoare	0,7 - 0,6	2 - 3	0,5	80 - 120
	Compactoare pe pneuri grele	0,25 - 0,40	2 - 8	2 - 3	250 - 900
	Rulouri netede (8-10 t)	0,10 - 0,20	4 - 6	1,5 - 2,5	15 - 30
	Maiuri mecanice	0,4	2 - 3	0,5	50
	Pietriș și balast argilos	Rulouri vibratoare grele	0,4 - 0,6	6 - 80	1,5 - 2,5
Compactoare pe pneuri grele		0,1 - 0,4	6 - 10	2 - 3	100 - 200
Placă vibratoare		0,5 - 0,6	5 - 6	0,5	50
Maiuri mecanice		0,3 - 0,4	3 - 4	0,5	20
Rulouri netede (8-10 t)		0,15 - 0,20	5 - 6	1,5 - 2	10 - 20



**Continuarea tabelului 2.4**

<i>Tip pământ</i>	<i>Utilaj de compactare</i>	<i>Grosimea stratului, m</i>	<i>Numărul de treceri</i>	<i>Viteza de lucru, km/h</i>	<i>Productivitatea m<sup>3</sup>/h</i>
Nisipuri uniforme și neuniforme cu pietriș cu sau fără fracțiuni fine	Rulouri vibratoare (5 t)	0,5 - 0,6	3 - 4	1,5 - 2,0	350 - 450
	Plăci vibratoare	0,7 - 0,8	2 - 3	0,4	70 - 80
	Compactoare pe pneuri grele	0,3 - 0,5	4 - 6	2 - 3	200 - 400
	Rulouri netede (8-10 t)	0,2	5 - 6	1,5 - 2	12 - 30
	Maiuri mecanice	0,4	2 - 3	0,5	30
Nisipuri prăfoase și nisipuri argiloase	Rulouri vibratoare (4-5 t)	0,4 - 0,6	5 - 6	1,5 - 2	200 - 280
	Plăci vibratoare	0,5	5 - 6	0,4	50
	Compactoare pe pneuri ușoare	0,2	8 - 10	5	100 - 200
	Compactoare pe pneuri grele	0,3 - 0,4	8 - 10	2 - 3	150 - 200
	Maiuri mecanice	0,4	3 - 4	0,5	25
Praful, nisipuri foarte fine, nisip fin prăfos sau argilos	Rulouri picior de oaie (6 t)	0,2	10 - 16	2,5 - 5	30 - 40
	Rulouri picior de oaie (16 t)	0,2	8 - 12	1,5 - 2,5	25 - 30

**Tabelul 2.5. Indicații privind compactarea solurilor**

<i>Tip compactor</i>	<i>Solul adecvat</i>	<i>Efectul maxim în adâncime, mm</i>	<i>Densitatea obținută</i>	<i>Greutate maximă, t</i>
Picior de oaie	Argilă, pământ argilos, pietriș cu liant de argilă	175-305	Aproape uniformă	20
Cu cilindri tandem, cu două axe	Pământ argilos	100-200	Medie	16
Cu cilindri tandem, cu trei axe	Pământ argilos	100-200	Medie	20
Cu trei roți cu pneuri	Material granular	100-200	Medie spre uniformă	20
Pneumatic, cu pneu mic	Pământ argilos, argilă cu nisip, pietriș cu nisip	100-200	Medie spre uniformă	12
Pneumatic, cu pneu mare	Toate tipurile	75-150	Uniformă	50
Vibrator	Nisip, pământ argilos, nisip argilos	Peste 600	Uniformă	30
Mixt	Toate tipurile	75-150	Uniformă	20

Față de compactarea statică care este limitată la aplicare pentru straturile superioare ale terenului, compactarea prin vibrație produce un efect dinamic resimțit în adâncime. Se știe că la compactarea prin impact, adâncimea până la care este resimțit efortul de compactare este dependentă de greutatea utilajului și de natura materialului ce necesită compactare, inclusă în tabelul 2.6, și are valori mult mai mari decât în cazul compactării convenționale.

**Tabelul 2.6. Corelarea tipului solului cu echipamentul de compactat prin vibrație**

<i>Tipul solului</i>	<i>Efectul de compactare în adâncime, în m</i>	
	<i>Compactoare cu masa între 10...15 t</i>	<i>Compactoare cu masa între 15 t...30 t</i>
Compactarea solurilor necoezive	0.50	1.00
Compactarea solurilor coezive	1.00	1.50

Concluzionând, procesul de compactare poate fi afectat de următorii factori variabili:

- pentru solurile necoezive:
  - a) categoria solului și coeficientul de neuniformitate;
  - b) conținutul de apă;
  - c) mărimea efortului de compactare;
  - d) grosimea stratului care trebuie compactat;
  - e) caracteristicile tehnico-funcționale ale echipamentului de compactare;
- pentru solurile coezive:
  - a) textura solului inclusiv conținutul de argilă și plasticitatea;
  - b) conținutul de apă și gradul de saturație;
  - c) mărimea efortului de compactare;
  - d) grosimea stratului care trebuie compactat;

e) caracteristicile tehnico-funcționale ale echipamentului de compactare.

Deși există mulți factori care afectează compactarea, conținutul de umiditate este factorul cel mai important, fiindcă dacă solul conține cantitatea optimă de apă, aceasta va fi ca un lubrifiant care va permite particulelor să alunece una peste cealaltă și să se obțină o compactare optimă.

Dacă un sol are umiditatea prea mare, este foarte probabil să devină elastic sub rulou. După trecerea ruloului, particulele solului revin în poziția inițială din cauza presiunii apei. În situația când un sol este prea uscat, este foarte probabil să se comporte ca un element plastic.

Mai multe metode folosite pentru claritatea efectului de compactare în sol se bazează pe relații empirice/semiempirice sau pe rezultatele determinărilor experimentale *in situ*. La moment, ca urmare a dezvoltării aplicațiilor software, a fost posibil de realizat modele care să simuleze efectul compactării cât mai aproape de realitate, combinând rezultatele testelor de laborator cu relațiile de calcul specifice teoriilor mecanicii și rezistenței materialelor aplicate atât în cazul pământurilor, cât și pentru structura metalică a echipamentelor de compactat.

Astfel, începând de la tehnologia compactării pernelor de balast pentru platformele industriale și până la compactarea pământurilor, infrastructurii și a îmbrăcăminților asfaltice ale drumurilor și pistelor, se etalează o gamă largă de cerințe tehnice și tehnologice care trebuie satisfăcute de o mașină compactoare.

Conceptele de ergonomie, siguranță în funcționare (fiabilitate, mentenabilitate, disponibilitate) au impus o gândire sistemică în acest fel, începând cu faza de concepție și terminând cu introducerea în fabricație, la mașinile de compactat prin vibrație să se realizeze performanțele tehnice și de design. În acest mod, problema confortului în cabina de lucru a mecanicului operator este primordială, marcându-se ca o tendință tot mai actuală în acest

domeniu prin aplicarea concepției „umanizării” elementelor de comandă și microclimat în cabină.

Parametrii de confort sunt determinați, în mod direct, de nivelul zgomotului și vibrațiilor, nivelul higrotermic, vizibilitate, eforturile și cursele la manetele de comandă. Pentru a realiza efectul de compactare se urmărește atingerea amplitudinii vibrațiilor organului de compactat, iar în vederea realizării condițiilor ergonomice se urmărește diminuarea transmiterii vibrațiilor de la ruloul vibrator la structura utilajului. Pentru aceasta, s-au prevăzut trepte elastice de izolare a vibrațiilor compuse din elemente de cauciuc.

Această categorie de mașini pentru terasamente, în mod deosebit, impune a fi satisfăcut un criteriu specific, fundamental, care înglobează două aspecte contradictorii, și anume:

- realizarea parametrilor vibrațiilor de lucru la ruloul vibrator pentru compactare;
- încadrarea parametrilor de vibrații în limitele admisibile la postul de lucru al mecanicului în scopul asigurării parametrilor ergonomici și, în același timp, al menținerii parametrilor caracteristici siguranței de funcționare.

Spre deosebire de aceste deziderate, structura mașinilor de compactat prin vibrație a cunoscut o evoluție explozivă materializată prin realizarea unor mașini cu performanțe operaționale ridicate. În acest sens se subliniază câteva elemente constructive după cum urmează:

- șasiul este articulat la mijloc cu părțile componente echilibrate pe cele două axe (față/spate);
- tracțiunea se realizează fie numai pe puntea din spate, fie total pe ambele punți;
- acțiunea vibroexcitatorului inerțial și a sistemului de deplasare se realizează integral hidrostatic;
- vibroexcitatorul este de tip inerțial cu forța perturbatoare unidirecțională sau rotitoare.

Prin urmare, aceste inovații tehnice își găsesc aplicabilitatea în desfășurarea procesului tehnologic de compactare prin obținerea unui grad de compactare, asigurând parametrii de performanță ai echipamentului de compactat în corelație cu natura materialului ce necesită compactare. La finalul procesului de compactare, dacă tehnologia de lucru a fost corect utilizată și dacă echipamentul de compactat a fost în stare operațională optimă, trebuie să obținem fundații de drum sau construcții civile care să aibă parametrii de rezistență și de stabilitate în conformitate cu standardele în vigoare.

## 2.5. Capabilitatea tehnologică

Capabilitatea tehnologică a noilor echipamente de compactare arată nivelul de performanță tehnică exprimat de parametrii constructivi și funcționali ce au rol determinant în calitatea și eficiența procesului de compactare [46].

Așadar, capabilitatea tehnologică poate fi determinată prin nivelurile de performanță ale parametrilor constructivi, parametrilor funcționali și parametrilor capacității de lucru.

### a) *Parametrii constructivi*

Din această categoria de parametri constructivi care au influență directă asupra tehnologiilor de compactare fac parte următorii:

- *parametrii geometrici:*
  - diametrul ruloului/pneului;
  - lățimea ruloului/pneului;
  - distanța dintre axe (ampatamentul);
  - razele de viraj;
  - garda la sol;
  - dimensiunile de gabarit (înălțime, lungime, lățime);
  - suprafața plăcii/maiului;
- *parametrii gravimetrice:*
  - greutatea totală;
  - greutatea repartizată la nivelul suprafeței de sprijin pe organele de compactare și/sau rulare (sprijinire/deplasare) [46].

### **b) Parametrii funcționali**

Din această categorie de parametri funcționali ai echipamentului de compactare cu influență directă asupra calității compactării mixturii asfaltice fac parte:

- viteza de deplasare în timpul compactării;
- încărcarea statică liniară la contactul rului–suprafață de compactare;
- regimul vibrațiilor tehnologice;
- factorul de apăsare tehnologică (factorul Nijboer).

### **c) Parametrii capacității de lucru**

Capacitatea de lucru a echipamentelor de compactat se caracterizează prin efectuarea parametrilor geometrici, a parametrilor de finisare și a productivității [46].

Pentru realizarea covorului asfaltic cu ajutorul compactoarelor se impune analiza parametrilor de lucru în scopul asigurării corelațiilor tehnice și tehnologice necesare.

Parametrii geometrici ai pământului/covorului asfaltic se materializează atât prin lungimi, unghiuri și grad de planeitate a suprafeței realizate, cât și prin grosimea stratului.

Productivitatea realizată cu ajutorul compactoarelor vibratoare poate fi caracterizată prin productivitatea de suprafață și cea fizică, ambele determinate în funcție de următorii parametri: durata de timp necesară pentru compactare, numărul de compactoare aflate simultan în procesul de lucru, modul de dispunere în frontul de lucru, lățimea de compactare și viteza de deplasare în timpul compactării.

Parametrii de finisare caracterizează gradul de închidere a rosturilor, gradul de închidere a porilor din stratul superficial și durata de compactare–finisare, care trebuie să fie mai mică decât intervalul de timp în care se răcește mixtura până la temperatura critică.

## ANALIZA DINAMICĂ A INTERACȚIUNII RULOU VIBRATOR–TEREN PENTRU PĂMÂNTURI

### 3.1. Generalități

Sistemele mecanice au în structura lor elemente de mișcare, corpuri rigide, elastice și articulații. Cât privește elementele de mișcare, acestea sunt materializate prin corpuri care au diferite configurații geometrice și care sunt legate unele de altele prin articulații. Astfel, rolul articulațiilor este de a efectua posibilitatea mișcării elementelor sau de a impune restricții sau constrângeri ale mișcărilor relative ale elementelor componente ale sistemului mecanic [46].

Astfel, prin examinarea structurală a unui sistem mecanic se analizează identificarea dimensiunilor și modul de dispunere al elementelor sistemului în raport cu funcția impusă acestuia [46].

Analiza cinematică include studiul mișcării fiecărui element component al sistemului mecanic, fiind obligatorie cunoașterea în orice moment de timp a valorilor și orientărilor vectorilor de poziție, accelerație, viteză fără a ține cont de cauzele care produc această mișcare.

Analiza este necesară, întrucât rezultatele obținute vor constitui condițiile inițiale utile efectuării analizei dinamice. Aceasta cuprinde cercetările mișcării elementelor sistemului mecanic la acțiunea forțelor exterioare aplicate, luând în considerare forțele și momentele de inerție care apar ca efect al mișcării sistemului. Așadar, finalitatea acestui studiu constă în precizarea forțelor și deformațiilor care apar în elementele componente ale sistemului mecanic în timpul mișcării sale [36, 46].



Stabilirea unui model al unui sistem mecanic comportă următoarele etape:

- caracteristicile factorilor și elementelor care compun sistemul;

- elaborarea modelului care cuprinde elementele sau subsistemele componente, stabilindu-se modul de interacțiune al elementelor/subsistemelor între ele. În această fază se impune alegerea unui criteriu/unor criterii de performanță al(e) sistemului modelat;

- stabilirea soluției: cu alte cuvinte, modelul este utilizat într-un proces de proiectare a sistemului, succedat de analize și încercări care conduc la îmbunătățirea proiectelor. Astfel, se obține o soluție când se consideră că răspunsul obținut la un moment dat este „cel mai bun” în raport cu criteriile de performanță stabilite;

- definitivarea modelului, adică stabilirea unor parametri de intrare anumiți și compararea mărimilor de ieșire obținute pe baza modelului cu cele ale sistemului real. Astfel, ambele mărimi de ieșire ar trebui să aibă valori comparabile, cu o diferență minim admisă, pentru ca modelul să fie acceptat ca o reprezentare valabilă a sistemului;

- realizarea modelului funcțional care cuprinde o fază preliminară de experimentare (prin funcționare, prototip, instalație pilot, serie zero etc.) urmată de realizarea integrală când se trece la construcția sistemului modelat.

Analiza dinamică a unui sistem mecanic constă în determinarea răspunsului (sau a efectelor de natură mecanică asupra sistemului) acestuia la acțiunea unor deplasări sau sarcini impuse, care sunt variabile în timp, numite excitații sau perturbații [37].

Răspunsul sistemului este influențat, pe de o parte, de caracteristicile mecanice, iar pe de altă parte, de parametrii excitației. Generalmente, problemele de dinamica sistemelor există în stabilirea relațiilor dintre excitație, caracteristicile dinamice ale sistemului mecanic studiat și răspunsul dat [38, 46].

Așadar, în general, ecuația de mișcare a sistemului mecanic are forma următoare:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (3.1)$$

unde:  $M$  este matricea masei;  $C$  - matricea de amortizare vâscoasă (de regulă semipozitivă, constantă și simetrică);  $K$  - matricea de rigiditate (semipozitivă și simetrică);  $\{u\}, \{\dot{u}\}, \{\ddot{u}\}$  - vectorul deplasărilor, accelerațiilor modale, vitezelor;  $f(t)$  - vectorul excitațiilor sau încărcărilor modale;  $t$  - variabila timp [46].

Problemele de dinamică a sistemelor sunt împărțite după modul de abordare în abordări directe și inverse [39, 46]. Problema directă este cea în care se cunosc ecuațiile care descriu comportarea dinamică a sistemului, se cunoaște excitația și se cere răspunsul acestuia. Atunci problema inversă are două variante:

- când se cunoaște sistemul și răspunsul acestuia, dar nu se cunoaște excitația;

- când se cunoaște răspunsul sistemului la o excitație dată și nu se cunosc ecuațiile de mișcare, configurația sistemului sau unii parametri specifici ai acestuia;

### **3.2. Metode de analiză comparată a procesului de compactare prin vibrație**

Pentru efectuarea procesului de compactare a pământurilor se folosesc procedee dinamice de rulare-comprimare. Prin contactul dintre un ruloul cilindric și suprafața pământului se transmite un câmp staționar de vibrații armonice care au misiunea de a produce efectul de undă pe întreaga adâncime a stratului [45].

Determinarea efectului de compactare, care fiind concomitent atât mărirea densității terenului, cât și micșorarea golurilor interioare, constrânge compatibilizarea parametrică a mașinilor vibratoare de compactat cu parametrii fizico-mecanici ai terenurilor.

Așadar, modelarea cât mai bună a comportării vâscoelastoplastice a pământurilor sub acțiunea dinamică a vibrațiilor poate fi efectuată numai printr-un proces de monitorizare

în timp real cu evaluarea parametrică a răspunsului dinamic al vibrocompactatorului în contact cu terenul.

Prin urmare, s-au analizat modelele vâscoelastice Maxwell, Voigt-Kelvin, Voigt-Kelvin-Hooke, Zener, Voigt-Kelvin-Newton și Voigt-Kelvin-Hooke-Newton, care în unele condiții dau informații foarte precise ale comportării în timp real al terenului.

Pentru modelele enumerate au fost scrise ecuațiile dinamice corespunzătoare unor excitații definite și a răspunsurilor corespunzătoare. În acest sens au fost stabilite expresiile de răspuns a trei parametri de interes în procesul de compactare, și anume: forța maximă transmisă terenului ( $Q_0$ ), amplitudinea deplasării ( $A$ ) și transmisibilitatea ( $T$ ). Aceste formule au fost realizate ca relații între parametrii vâscoelastoplastici ai terenului cu mărimile de acțiune ale excitației dinamice a compactoarelor [45].

### 3.2.1. Modelul Voigt-Kelvin ( $E/V$ )

Modelul dat descrie un sistem fizic liniar cu deformație elastică, alcătuită prin legarea în paralel a unui element elastic cu un element vâscos. În figura 3.1, a) este exemplificat și reprezentat simbolic modelul cu excitație cinematică, iar în figura 3.1, b) modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

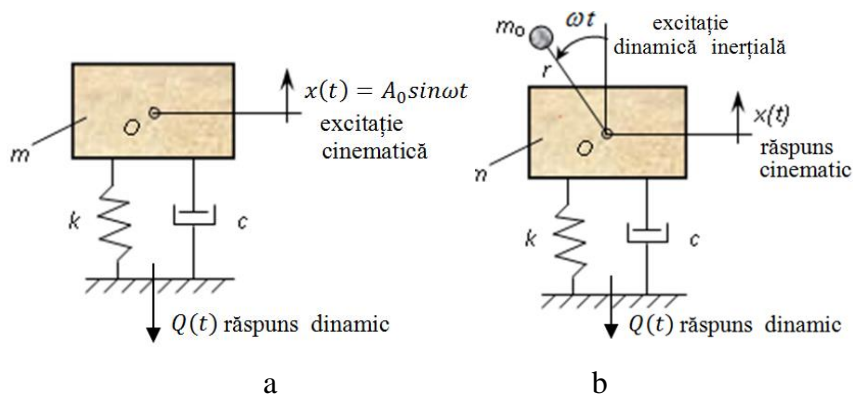


Fig. 3.1. Modelul Voigt-Kelvin [45]

Excitația cinematică de tipul  $x(t) = A_0 \sin \omega t$  face ca sistemul să transfere energie la bază, să ducă la un răspuns dinamic în legături care este reprezentat prin forța vâscoasă  $Q(t) = c\dot{x} + kx$  [45].

### 3.2.1.1. Răspunsul sistemului E/V la excitația dinamică inerțială armonică

Examinăm schema dinamică din figura 3.1, b), la care toate elementele vâscoelastice ale terenului sunt identice pentru o stare anumită și regim tehnologic. Așadar, sistemul figurat este vâscoelastic liniar.

Astfel, pot fi determinate următoarele etape de analiză [41, 45, 129]:

a) excitația de tip inerțial în mișcare de rotație a masei  $m_0$  cu raza  $r$  și viteza unghiulară  $\omega$  este arătată prin funcția de forță armonică după cum urmează:

$$F(t) = m_0 r \omega^2 \sin(\omega t) \quad (32)$$

b) răspunsul la deplasare instantanee este de forma  $x(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$ , iar forța de reacție este  $Q(t) = Q_0 \sin(\omega t - \varphi - \theta)$ ;

c) ecuația diferențială de echilibru dinamic are următoarea formă:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 r \omega^2 \sin(\omega t)$$

unde forța de reacție instantanee reiese astfel:

$$Q(t) = c\dot{x} + kx$$

Se introduc notațiile uzuale:

$$p^2 = \frac{k}{m + m_0}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$\zeta = \frac{c}{2(m_0 + m)p}$$

Așadar, mărimile care intervin la răspunsul dinamic le putem nota după cum urmează:

$$F_0 = m_0 r \omega^2 \text{ sau } F_0 = m_0 r p^2 \Omega^2 \text{ sau } F_0 = m_0 r \frac{k}{m+m_0} \Omega^2$$

$$A_{st} = \frac{m_0}{m_0 + m} r$$

$$F_0^{st} = k A_{st}$$

unde  $A_{st}$  se mai notează  $A_{stabil}$  sau  $A_\infty$  și reprezintă amplitudinea în postrezonanță  $F_0^{static}$  și reprezintă forța corespunzătoare deformației elastice cu  $A_{st}$ .

Excitația dinamică inerțială în dependență de pulsația de excitație relativă  $\Omega$  este scrisă sub forma:

$$F_0 = F_0^{st} \Omega^2 \quad (3.3)$$

Forța transmisă terenului exprimată prin ecuația de ordinul I, arată astfel:

$$Q(t) = c\dot{x} + kx = Q_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

Deci, în exprimare complexă  $\tilde{Q}$  poate fi scrisă sub forma:

$$\tilde{Q} = \frac{1 + 2\zeta\Omega j}{(1 - \Omega^2) + 2\zeta\Omega j} \Omega^2 F_0^{st} e^{j\omega t} \quad (3.4)$$

în care  $j = \sqrt{-1}$ , deci, avem:

$$Q_0 = F_0^{st} \Omega^2 \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (3.5)$$

Transmisibilitatea  $T$  este definită astfel:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st} \Omega^2}$$

de unde:

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2 \zeta^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (3.6)$$

Amplitudinea mișcării ce corespunde deplasării instantanee ca răspuns al sistemului are forma:

$$A = \frac{\Omega^2 A_{st}}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \zeta^2}} \quad (3.7)$$

și anume,  $A = A(\omega, \zeta)$  este o funcție exprimată în coordonata unghiulară relativă  $\Omega$  și fracțiunea de amortizare  $\zeta$ .

Caracteristica modelului E/V este preponderent elastică, ceea ce face ca schematizarea aleasă să poată fi potrivită numai în cazul terenurilor elastice, elastoplastice cu influență redusă a vâscozității naturale [45].

### 3.2.2. Modelul Maxwell (E-V)

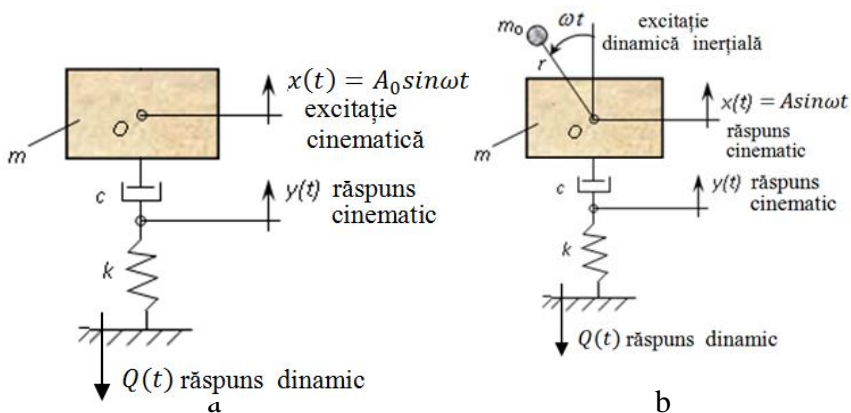


Fig. 3.2. Modelul Maxwell [45]

Comportarea fizică liniară a terenului este descrisă de modelul dat. Este schematizat prin legarea în serie a unui element elastic cu un element vâscos. În figura 3.2, a) se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.2, b) este dat modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

### 3.2.2.1. Răspunsul sistemului E-V la excitația dinamică inerțială armonică

Așadar, este transmisă forța  $Q = ky = c(\dot{x} - \dot{y})$  unde  $\dot{x}$  și  $\dot{y}$  sunt vitezele absolute ale deplasărilor instantanee absolute  $x$  și  $y$ . Excitația dinamică inerțială în funcție de pulsația de excitație relativă  $\Omega$  are următoarea formă [41, 129]:

$$F_0 = F_0^{st} \Omega^2 \quad (3.8)$$

Se integrează următoarele notații și obținem:

$$p^2 = \frac{k}{m + m_0}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$\zeta = \frac{c}{2(m_0 + m)p}$$

$$A_{st} = \frac{m_0}{m_0 + m} r$$

$$F_0^{st} = kA_{st}$$

Utilizând formalismul reprezentării mărimilor instantanee în complex, obținem:

$$\tilde{Q}_0 = \frac{jc\omega F_0}{-m\omega^2 k + jc\omega(k - m\omega^2)}$$

cu valoarea maximă (în modul) a mărimii complexe  $\tilde{Q}_0$ , scrisă după cum urmează:

$$Q_0 = |\tilde{Q}_0| = \sqrt{\frac{c^2 \omega^2 k^2 F_0^2}{m^2 \omega^4 k^2 + c^2 \omega^2 (k - m\omega^2)^2}}$$

sau:

$$Q_0 = F_0^{st} \Omega^2 \frac{2\zeta\Omega}{\sqrt{\Omega^4 + 4\zeta^2 \Omega^2 (1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.9)$$

Transmisibilitatea T este definită sub forma:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st} \Omega^2}$$

sau mai detaliat se prezintă:

$$T = \frac{2\zeta}{\sqrt{\Omega^2 + 4\zeta^2(1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.10)$$

Astfel, amplitudinea mișcării este definită sub forma [40]:

$$A = A_{st} \Omega^2 \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 \Omega^2}{\Omega^4 + 4\zeta^2 \Omega^2 (1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.11)$$

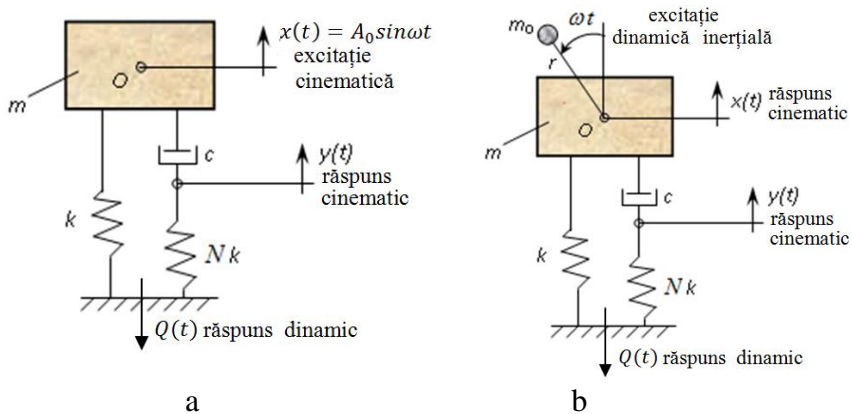
Caracteristica modelului E-V este preponderent vâscoasă, ceea ce face ca aplicarea ca schematizare de calcul să fie potrivită numai pentru terenurile granulare nisipoase cu regimul de umiditate semnificativ [45].

### ***3.2.3. Modelul Zener E/(E-V) și răspunsul sistemului E/(E-V) la excitația dinamică inerțială armonică***

Acest model este schematizat ca un sistem liniar cu deformație elastică în mod pregnant care este alcătuit prin legarea în paralel a unui element elastic cu un ansamblu dintr-un element vâscos cuplat cu un multiplu elastic. În figura 3.3, a) se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.3, b) modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

Pentru modelul schematizat reprezentat în figura 3.3, b) toate elementele elastice și vâscoase sunt constante, sistemul este liniar elastic. Răspunsul cinematic  $x(t) = X_0 \sin(\omega t - \varphi)$ ,  $y(t) = Y_0 \sin(\omega t - \theta)$  și răspunsul dinamic în legătura bazei  $Q = Q_0 \sin(\omega t - \varepsilon)$  sunt mărimile specifice ce caracterizează comportamentul dinamic al sistemului vibrator-teren cu modelul complex E/(E-V) [45, 129].





**Fig. 3.3. Modelul Zener [45]**

Astfel, ecuațiile mișcării conform sursei [41]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + kx = F_0 e^{j\omega t} \\ c(\dot{x} - \dot{y}) = Nk\dot{y} \end{cases} \quad (3.12)$$

unde:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= X_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \\ \tilde{y} &= Y_0 e^{j(\omega t - \theta)} \end{aligned}$$

cu specificațiile:

$$\tilde{X}_0 = \tilde{A} e^{j\varphi}; \quad \Omega = \frac{\omega}{p_0}$$

Așadar, amplitudinea complexă  $\tilde{A}$  este definită sub forma:

$$\tilde{A} = F_0 \frac{kN + jc\omega}{kN(k - m\omega^2) + jc\omega(kN + k - m\omega^2)}$$

Forța perturbatoare inerțială rotitoare cu  $\Omega$  are forma:

$$F_0 = m_0 r p_0^2 \Omega^2 = m_0 r \frac{k}{m_0 + m} \Omega^2 = A_{st} k \Omega^2 = F_0^{st} \Omega^2$$

$$F_0 = F_0^{st} \Omega^2 \quad (3.13)$$

Amplitudinea deplasării  $x(t)$  are forma:

$$A^2 = F_0^2 \frac{k^2 N^2 + c^2 \omega^2}{[kN(k - m\omega^2)]^2 + [c\omega(kN + k - m\omega^2)]^2}$$

în care

$$A = \frac{F_0}{k} \sqrt{\frac{k^2 N^2 + c^2 \omega^2}{k^2 N^2 (k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2 (kN + k - m\omega^2)^2}}$$

sau

$$A = A_{st} \Omega^2 \sqrt{\frac{N^2 + 4\zeta^2 \Omega^2}{N^2 (1 - \Omega^2)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N + 1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.14)$$

Forța maximă transmisă bazei, și anume terenului, are forma:

$$Q_0 = A_{st} k \Omega^2 \sqrt{\frac{N^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N + 1)^2}{N^2 (1 - \Omega^2)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N + 1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.15)$$

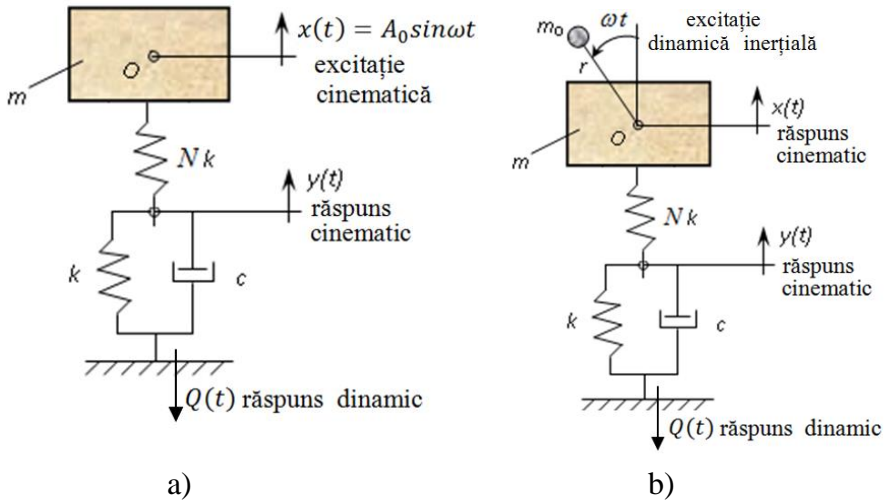
Transmisibilitatea  $T$  a forței transmise este definită sub forma:

$$T = \sqrt{\frac{N^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N + 1)^2}{N^2 (1 - \Omega^2)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N + 1 - \Omega^2)^2}} \quad (3.16)$$

### ***3.2.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke $E - (E/V)$ și răspunsul sistemului $E-(E/V)$ la excitația dinamică inerțială armonică***

Model dat este schematizat printr-un sistem cu deformație preponderent elastică. Este alcătuit prin legarea în serie a unui element multiplu elastic cu un ansamblu format dintr-un element elastic cuplat cu unul vâcos.

În figura 3.4, a) se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.4, b) modelul cu excitație dinamică, model care este studiat [40, 45, 129].



**Fig. 3.4. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke [45]**

Schematizarea liniară din figura 3.4, b) demonstrează faptul că la excitația dinamică cu forță perturbatoare rotitoare  $F_0 = m_0 r \omega^2$  răspunsul sistemului constă în  $x(t)$  și  $y(t)$  ca mărimi cinematice (deplasări) instantanee și o mărime dinamică instantanee  $Q(t)$  ca forță de reacție la bază, anume la contactul vibrator-teren.

Ecuțiile mișcării la echilibrul dinamic sunt date conform sursei [41]:

$$\begin{aligned} (m_0 + m)\ddot{\tilde{x}} + kN(\tilde{x} - \tilde{y}) &= m_0 r \omega^2 e^{j\omega t} \\ k\tilde{y} + c\dot{\tilde{y}} &= kN(\tilde{x} - \tilde{y}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Formularea în complex pentru parametrii de interes are forma:

$$\tilde{Q} = k\tilde{y} + c\dot{\tilde{y}}$$

răspunsul dinamic în teren:

$$\tilde{x} = X_0 e^{j(\omega t - \theta)}$$

$$\tilde{y} = Y_0 e^{j(\omega t - \theta)}$$

răspunsul cinematic al deplasărilor instantanee cu notațiile:

$$\tilde{X}_0 = \tilde{A} e^{j\omega}$$

$$\tilde{Y}_0 = \tilde{B} e^{j\theta}$$

Forța perturbatoare cu pulsația relativă  $\Omega$  are forma:

$$F_0 = m_0 r \omega^2 = m_0 r p_0^2 \Omega^2 = \frac{m_0 r k}{m_0 + m} \Omega^2 = A_{st} k \Omega^2 = F_0^{st} \Omega^2$$

sau

$$F_0 = F_0^{st} \Omega^2 \quad (3.18)$$

în care

$$\Omega = \frac{\omega}{p_0} \text{ este pulsația relativă;}$$

iar

$$p_0^2 = \frac{k}{m_0 + m}, \text{ în care } p_0 \text{ este pulsația proprie.}$$

Așadar, forța transmisă terenului are forma:

$$\tilde{Q} = F_0 \frac{(k^2 N + j c \omega k N) e^{j \omega t}}{k^2 N - \omega^2 (m + m_0) (1 + N) + j c \omega [k N - \omega^2 (m_0 + m)]}$$

sau

$$\tilde{Q}_0 = F_0^{st} \Omega^2 \frac{N (1 + j 2 \zeta \Omega)}{N - (1 + N) \Omega^2 + j 2 \zeta \Omega (N - \Omega^2)} e^{j \omega t}$$

cu valoarea maximă:

$$Q_0 = |\tilde{Q}_0| = F_0^{st} \Omega^2 \frac{N \sqrt{1 + 4 \zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1 + N)^2 \Omega^2]^2 + 4 \zeta^2 2 (N - \Omega^2)^2}}$$

sau

$$Q_0 = F_0^{st} \Omega^2 \frac{N \sqrt{1 + 4 \zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1 + N)^2 \Omega^2]^2 + 4 \zeta^2 2 (N - \Omega^2)^2}} \quad (3.19)$$

Transmisibilitatea forței perturbatoare în teren are următoarea relație de calcul:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st} \Omega^2} = \frac{N \sqrt{1 + 4 \zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1 + N)^2 \Omega^2]^2 + 4 \zeta^2 2 (N - \Omega^2)^2}}$$

sau

$$T = \frac{N \sqrt{1 + 4 \zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1 + N)^2 \Omega^2]^2 + 4 \zeta^2 2 (N - \Omega^2)^2}} \quad (3.20)$$

Amplitudinea deplasării  $x(t)$  sau a masei  $m$  are următoarea formă:

$$A = \frac{F_0^{st} \Omega^2}{k} \frac{\sqrt{(1+N)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1-N)\Omega^2]^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N - \Omega^2)^2}}$$

sau

$$A = A_{st} \Omega^2 \frac{\sqrt{(1+N)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2}}{\sqrt{[N - (1-N)\Omega^2]^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 (N - \Omega^2)^2}} \quad (3.21)$$

### 3.2.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton $V-(E/V)$ și răspunsul sistemului $V-(E/V)$ la excitația dinamică inerțială armonică

Modelul dat este unul liniar cu deformare vâscoasă. Este alcătuit prin legarea în serie a unui element vâscos cu un ansamblu de element elastic cuplat cu un element vâscos. În figura 3.5, a) se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.5, b) modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

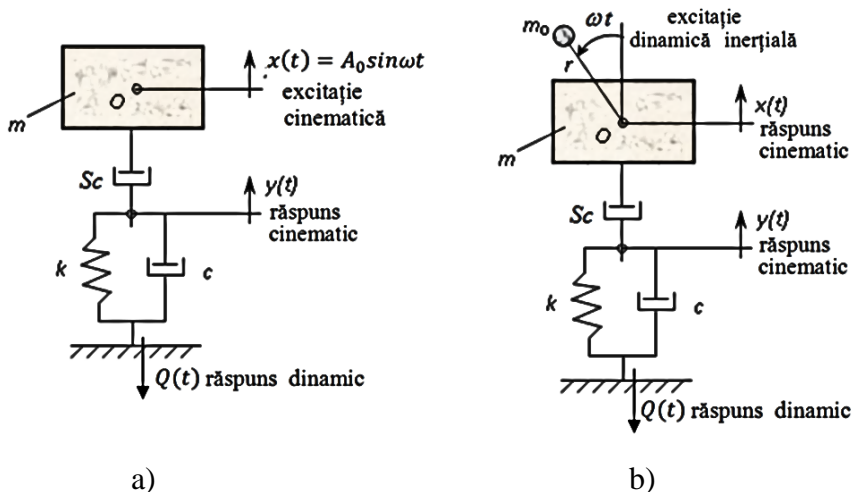


Fig. 3.5. Modelul Voigt-Kelvin-Newton [45]

Schematizarea liniară din figura 3.5, b) demonstrează faptul că la excitația dinamică cu forță perturbatoare rotitoare  $F_0 = m_0 r \omega^2$  răspunsul sistemului constă în  $x(t)$  și  $y(t)$  ca mărimi cinemate (deplasări) instantanee și o mărime dinamică instantanee  $Q(t)$  ca forță de reacție la bază anume la contactul vibrator-teren [45].

Ecuțiile mișcării în formă complexă sunt date conform sursei [41]:

$$\begin{cases} (m_0 + m)\ddot{\tilde{x}} + S c(\dot{\tilde{x}} - \dot{\tilde{y}}) = F_0 e^{j\omega t} \\ k\tilde{y} + c\dot{\tilde{y}} = S c(\dot{\tilde{x}} - \dot{\tilde{y}}) \end{cases} \quad (3.22)$$

unde avem:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= X_0 e^{j(\omega t - \varphi)} \\ \tilde{y} &= Y_0 e^{j(\omega t - \theta)} \end{aligned}$$

Forța  $\tilde{Q}$  are următoarea expresie:

$$\tilde{Q} = k\tilde{y} + c\dot{\tilde{y}}$$

$$\tilde{Q} = F_0^{st} \frac{2S\zeta\Omega^2(2\Omega\zeta - j)e^{j\omega t}}{\Omega[1 + 4S\zeta^2] - j2\zeta[S - (1 + S)\Omega^2]^2}$$

cu valoarea maximă de forma:

$$Q_0 = |\tilde{Q}_0| = F_0^{st} \Omega^2 \frac{2S\zeta\sqrt{1 + 4\zeta^2\Omega^2}}{\sqrt{\Omega^2[1 + 4S\zeta^2]^2 + 4\zeta^2[S - (1 + S)\Omega^2]^2}}$$

sau

$$Q_0 = F_0^{st} \Omega^2 \frac{2S\zeta\sqrt{1 + 4\zeta^2\Omega^2}}{\sqrt{\Omega^2[1 + 4S\zeta^2]^2 + 4\zeta^2[S - (1 + S)\Omega^2]^2}} \quad (3.23)$$

Transmisibilitatea  $T$  este dată de formula:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st}\Omega^2}$$

sau prin expresia analitică astfel:

$$T = \frac{2S\zeta\sqrt{1 + 4\zeta^2\Omega^2}}{\sqrt{\Omega^2[1 + 4S\zeta^2]^2 + 4\zeta^2[S - (1 + S)\Omega^2]^2}} \quad (3.24)$$

Amplitudinea deplasării instantanee  $x(t)$  sau a masei  $m$  are următoarea formă:

$$A = A_{st}\Omega^2 \sqrt{\frac{1 + 4\Omega^2\zeta^2(1 + S)^2}{\Omega^4(1 + 4S\zeta^2)^2 + 4\zeta^2\Omega^2[S - (1 + S)\Omega^2]^2}} \quad (3.25)$$

### 3.2.6. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton (E-V) - (E/V) și răspunsul sistemului (E-V) - (E/V) la excitația dinamică inerțială armonică

Modelul dat este un model liniar cu deformație vâscoasă. Este alcătuit prin legarea în serie a trei elemente: un element vâscos, un element elastic și un ansamblu de element elastic legat în paralel cu un element vâscos. În figura 3.6, a) se argumentează reprezentarea simbolică a modelului cu excitație cinematică, iar în figura 3.6, b) modelul cu excitație dinamică, model care este analizat [40, 45, 129].

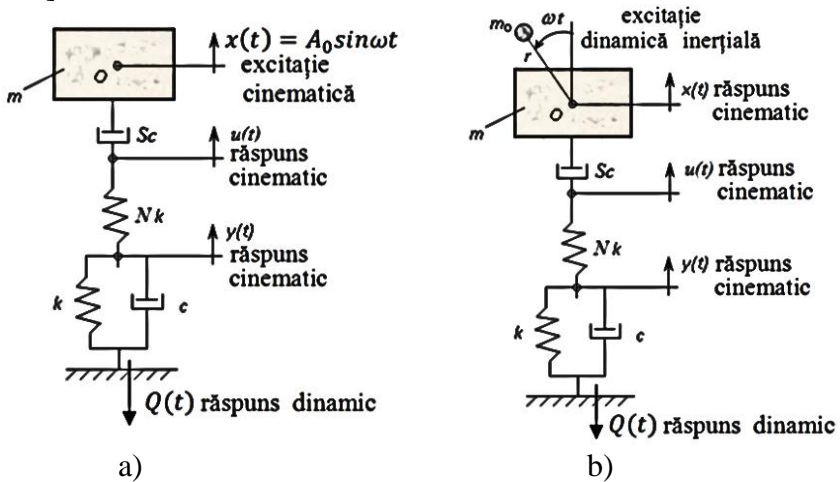


Fig. 3.6. Modelul Voigt-Kelvin-Hooke-Newton [45]

Schematizarea liniară din figura 3.6, b) demonstrează faptul că la excitația dinamică cu forță perturbatoare rotitoare  $F_0 = m_0 r \omega^2$  răspunsul sistemului constă în  $x(t)$ ,  $y(t)$  și  $u(t)$  ca mărimi cinemate (deplasări) instantanee și o mărime dinamică instantanee  $Q(t)$  ca forță de reacție la bază anume la contactul vibrator-teren [45, 129].

Ecuatiile mișcării sunt date conform sursei [41]:

$$\begin{aligned} (m + m_0)\ddot{x} + Sc(\dot{x} - \dot{u}) &= F_0 \cos \omega t \\ ky + c\dot{y} - kN(u - y) &= 0 \\ kN(u - y) - Sc(\dot{x} - \dot{u}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Se integrează notațiile pentru forța  $Q$ , încât:

$$\begin{aligned} Q &= ky + c\dot{y} \\ Q &= Nk(u - y) \\ Q &= Sc(\dot{x} - \dot{u}) \end{aligned}$$

Forța  $\tilde{Q}$  are următoarea expresie:

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= F_0^{st} \Omega^2 \frac{2S\zeta(1 + j2\Omega\zeta)e^{j\omega t}}{\left[4\frac{S}{N}\zeta^2\Omega^2 - 4S\zeta^2 - 1\right]\Omega^2 + j2\Omega\zeta\left[S - \Omega^2\left(1 + S + \frac{S}{N}\right)\right]} \end{aligned}$$

Iar cu valoarea maximă are forma:

$$\begin{aligned} Q_0 &= F_0^{st} \Omega^2 \frac{2S\zeta\Omega\sqrt{1 + 4\Omega^2\zeta^2}}{\sqrt{\Omega^2\left[1 + 4S\zeta^2 - \frac{4S}{N}\zeta^2\Omega^2\right]^2 + 4\zeta^2\left[S - \Omega^2\left(1 + S + \frac{S}{N}\right)\right]^2}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Transmisibilitatea  $T$  este dată de relația:

$$T = \frac{Q_0}{F_0^{st} \Omega^2}$$



sau prin expresia analitică astfel:

$$T = \frac{2S\zeta\Omega\sqrt{1+4\Omega^2\zeta^2}}{\sqrt{\Omega^2\left[1+4S\zeta^2-\frac{4S}{N}\zeta^2\Omega^2\right]^2+4\zeta^2\left[S-\Omega^2\left(1+S+\frac{S}{N}\right)\right]^2}} \quad (3.28)$$

Amplitudinea deplasării instantanee  $x(t)$  sau a masei  $m$  are următoarea formă:

$$A = A_{st}\Omega^2 \sqrt{\frac{(1-\frac{S}{N}4\zeta^2\Omega^2)^2+4\Omega^2\zeta^2(1+S+\frac{S}{N})^2}{\Omega^4\left[1+4S\zeta^2-\frac{4S}{N}\zeta^2\Omega^2\right]^2+4\zeta^2\Omega^2\left[S-\Omega^2\left(1+S+\frac{S}{N}\right)\right]^2}} \quad (3.29)$$

### 3.3. Mișcarea vibratorie a ansamblului vibrator-teren

Studiul dinamic al utilajelor de compactat prin vibrare se formulează în condițiile acceptării ipotezei comportării liniare elastice și de amortizare cu excitație inerțială armonică. Astfel, rezultatele sunt suficient de exacte pentru a recepționa răspunsuri utile, în majoritatea cazurilor erorile fiind destul de mici [40, 45]. Teoria dată este necesară pentru determinările preliminare ale unor parametri constructivi și funcționali ai organului de lucru.

Așadar, se pot adopta următoarele ipoteze de calcul asupra comportării dinamice a ansamblului vibrator-teren [42, 45]:

- pământul ca mediu reologic în general este reprezentat de modelul compus Voigt  $E/V$ , iar în afara zonei de rezonanță de modelul simplu Hooke  $E$ ;

- modelul dinamic al sistemului vibrator-teren nu ține seama de masa pământului (se neglijează proprietățile inerțiale ale pământului);

- sistemul cu două mase execută numai mișcări verticale într-un singur plan și pe direcție verticală;

- organul de lucru ce execută compactarea (placă, rulou) rămâne tot timpul orizontal (vibrațiile de rotații se neglijează);

- generatorul de vibrații unidirecționale este amplasat astfel, încât forța perturbatoare ce acționează pe verticală trece prin centrul de greutate al organului compactor (placă, rulou) care se află pe axa ei de simetrie [37, 45];

- axele de rotație ale excentricelor au deplasări mici, așa încât nu se iau în considerare (forțele de inerție care apar datorită deplasărilor cu valori mici).

Ipotezele date conduc la un model dinamic al ansamblului vibrator-teren ale căror relații sunt accesibile stabilirii soluțiilor tehnice. Astfel, în studiile care se efectuează în continuare vor fi eliminate treptat aceste ipoteze și ca rezultat se vor stabili relații teoretice complexe care vor reda din ce în ce mai exact comportarea reală a ansamblului vibrator-teren. Răspunsul dinamic se evaluează ținând seama de următorii factori [45]:

- comportarea dinamică corespunde vibrațiilor tehnologice în regim de lucru permanent și stabil, de regulă în postrezonanță;

- amplitudinea forței perturbatoare este variabilă în raport cu pulsația de excitație  $\omega$  de forma  $P_0 = m_0 r \omega^2$  atunci când regimul vibrațiilor este variat de la  $\omega = 0$  până la  $\omega^* = \omega_{postrezonanță} \gg p_{max}$ , în care  $p_{max}$  este pulsația proprie cu cea mai mare valoare;

- originea de timp se ia în momentul în care forța perturbatoare este maximă în modul și pozitivă;

- în regim dinamic stabil  $\omega > p_{max}$ , la postrezonanță cu  $\omega = const$  forța perturbatoare  $P_0 = m_0 r \omega^2$  este constantă.

### 3.3.1. Vibrațiile de translație verticală, răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastic

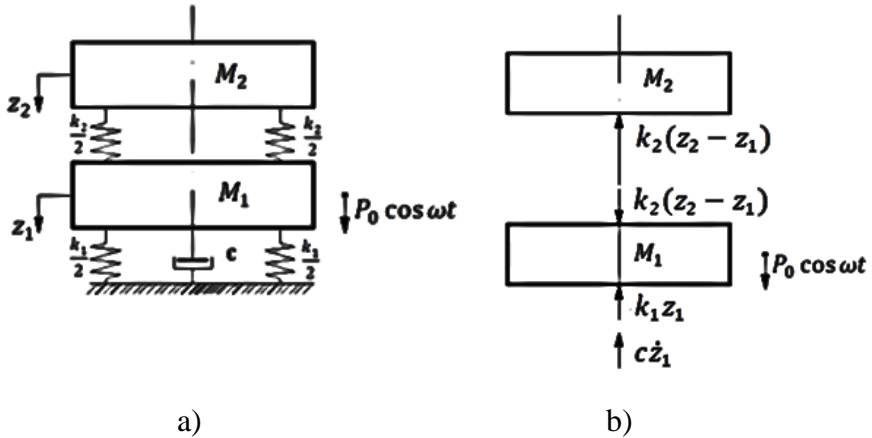


Fig. 3.7. Modelul mecanic al ansamblului vibrator-teren cu două mase de vibrare

a) Modelul dinamic; b) schema de forțe în regim de echilibru dinamic instantaneu [41, 45].

În astfel de cazuri, mișcarea vibratorie a ansamblului vibrator-teren se poate asimila cu cea a unui sistem cu mase în vibrație de translație pe verticală [41, 45].

Amplitudinile mișcării vibratorii [41, 45], în cazul modelului dinamic al pământului, schematizat după Voigt-Kelvin E/V potrivit figurii 3.7 vor fi determinate în regim stabil de excitație dinamică inerțială cu  $P_0 = m_0 r \omega^2$  și armonică cu  $P = P_0 \cos \omega t$ .

Pentru determinarea ecuațiilor mișcării vibratorii, se separă fiecare masă, aplicându-se forțele de legătură (fig. 3.7. b), și se scriu ecuațiile diferențiale ale mișcării maselor  $M_1$  și  $M_2$ , pe baza legii fundamentale a dinamicii [45]:

$$\begin{aligned} M_2 \ddot{z}_2 + k_2 z_2 - k_2 z_1 &= 0 \\ M_1 \ddot{z}_1 + (k_1 + k_2) z_1 - k_2 z_2 + c \dot{z}_1 &= P_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (3.30)$$

unde:  $M_1$  - masa inferioară (generatorul de vibrații cu talpa plăcii);  
 $M_2$  - masa superioară (motorul cu cadrul său suport);  
 $k_1$  - coeficientul de elasticitate al pământului;  
 $k_2$  - coeficientul de elasticitate al elementelor elastice (arcuri elicoidale, tampoane de cauciuc),  
 $c$  - coeficientul de amortizare vâscoasă;  
 $P_0$  - amplitudinea forței perturbatoare;  
 $\omega$  - pulsația forței perturbatoare;  
 $z_1, z_2$  - coordonatele instantanee de deplasare ale maselor  $M_1$  respectiv  $M_2$ .

Fiindcă se analizează regimul de lucru permanent, interesează numai vibrația forțată care se menține. Astfel, pentru rezolvarea sistemului de ecuații (3.30) se caută soluții particulare de forma [45]:

$$\begin{aligned} z_1 &= A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) \\ z_2 &= A_2 \cos(\omega t - \varphi_2) \end{aligned} \quad (3.31)$$

unde  $A_1, A_2$  sunt amplitudinile maselor  $M_1$ , respectiv  $M_2$ .

Se derivează în raport cu timpul, pe rând, relațiile (3.31) și obținem următoarele:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -\omega A_1 \sin(\omega t - \varphi_1) = D z_1 \\ \ddot{z}_1 &= -\omega^2 A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) = -\omega^2 z_1 \\ \dot{z}_2 &= -\omega A_2 \sin(\omega t - \varphi_2) = D z_2 \\ \ddot{z}_2 &= -\omega^2 A_2 \cos(\omega t - \varphi_2) = -\omega^2 z_2 \end{aligned} \quad (3.32)$$

în care simbolul  $D$  este operatorul  $\frac{d}{dt}$ . Se introduc valorile derivatelor (3.32) împreună cu soluțiile (3.31) în prima ecuație (3.30) și se înlocuiesc funcțiile trigonometrice  $\sin(\omega t - \varphi)$  și  $\cos(\omega t - \varphi)$  cu identitățile lor trigonometrice:

$$\begin{aligned} & [(-M_2 \omega^2 A_2 + k_2 A_2) \cos \varphi_2 - k_2 A_1 \cos \varphi_1] \cdot \cos \omega t \\ & + [(-M_2 \omega^2 A_2 + k_2 A_2) \sin \varphi_2 \\ & - k_2 A_1 \sin \varphi_1] \cdot \sin \omega t = 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Forțele din ecuația (3.30), fiind în echilibru dinamic instantaneu, deducem că prima parte a ecuației (3.33) reprezintă doi vectori ai căror rezultată este nulă în orice moment  $t$ . Așadar, fiecare din acești vectori trebuie să fie egali cu zero, astfel obținem:

$$\begin{aligned}(k_2 - M_2\omega^2)A_2 \cos \varphi_2 - k_2A_1 \cos \varphi_1 &= 0 \\ (k_2 - M_2\omega^2)A_2 \sin \varphi_2 - k_2A_1 \sin \varphi_1 &= 0\end{aligned}\quad (3.34)$$

de unde rezultă:

$$\begin{aligned}tg\varphi_1 &= tg\varphi_2 \\ \varphi_1 &= \varphi_2\end{aligned}\quad (3.35)$$

sau

$$\varphi_1 = \pi + \varphi_2$$

Cu toate acestea, utilizând valorile derivatelor care conțin operatorul  $D$ , sistemul de ecuații (3.30) se mai poate scrie sub formă:

$$\begin{aligned}-k_2z_1 + (k_2 - M_2\omega^2).z_2 &= 0 \\ (k_1 + k_2 - M_1\omega^2 + cD)z_1 - k_2z_2 &= P_0 \cdot \cos \omega t\end{aligned}\quad (3.36)$$

Din prima ecuație (3.36) rezultă:

$$z_1 = \frac{k_2 - M_2\omega^2}{k_2} \cdot z_2 = \left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right) \cdot z_2\quad (3.37)$$

În zona de rezonanță  $\frac{\omega^2}{p^2} < 1$ ,  $z_1$  este în fază cu  $z_2$ . Așadar,  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

În zona de postrezonanță  $\frac{\omega^2}{p^2} > 1$ ,  $z_1$  este în opoziție de fază cu  $z_2$ . Așadar:  $\varphi_1 = \pi + \varphi_2$ .

Cei doi vectori  $\bar{z}_1$  și  $\bar{z}_2$ , fiind coliniari și modulele lor satisfacând relațiile (3.37), se poate scrie:

$$\begin{aligned}A_1 &= A_2 \frac{k_2 - M_2\omega^2}{k_2} \\ A_2 &= A_1 \frac{k_2}{k_2 - M_2\omega^2}\end{aligned}\quad (3.38)$$

Înlocuind în cea de a doua ecuație din (3.36) valoarea lui  $z_2$  din (3.37), precum și  $z_1$  și  $\dot{z}_1$  din (3.32), obținem:

$$\frac{[(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot (k_2 - M_2\omega^2) - k_2^2] \cdot z_1 + (k_2 - M_2\omega^2) \cdot c\dot{z}_1}{k_2 - M_2\omega^2} = P_0 \cdot \cos \omega t$$

sau:

$$\begin{aligned} & \frac{[(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot (k_2 - M_2\omega^2) - k_2^2] \cdot \cos(\omega t - \varphi_1)}{k_2 - M_2\omega^2} \\ & - \frac{A_1\omega c(k_2 - M_2\omega^2) \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)}{k_2 - M_2\omega^2} \quad (3.39) \\ & = P_0 \cdot \cos \omega t \end{aligned}$$

La fel, pe baza echilibrului dinamic instantaneu se deduce că prima parte a expresiei (3.38) reprezintă doi vectori ortogonali a căror rezultantă este egală cu vectorul din partea a doua; din egalitatea modulelor rezultă:

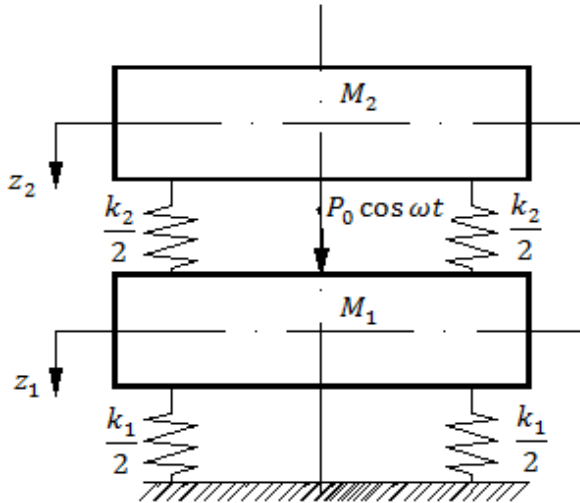
$$A_1 = \frac{P_0(k_2 - M_2\omega^2)}{\sqrt{[(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot (k_2 - M_2\omega^2) - k_2^2]^2 + c^2\omega^2(k_2 - M_2\omega^2)^2}} \quad (3.40)$$

În cazul în care în ecuația (3.38) se înlocuiește  $A_1$  cu expresia sa din (3.39), obținem valoarea amplitudinii masei  $A_2 = A_2(\omega)$  și rezultă [45]:

$$A_2 = \frac{P_0 k_2}{\sqrt{[(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot (k_2 - M_2\omega^2) - k_2^2]^2 + c^2\omega^2(k_2 - M_2\omega^2)^2}} \quad (3.41)$$

### 3.3.2. Răspunsul dinamic pentru modelul elastic

Amplitudinea mișcării vibratorii în cazul modelului dinamic al pământului Hooke (E), schematizat în figura 3.8, se caracterizează similar cu abordarea anterioară [41, 45].



**Fig. 3.8. Modelul mecanic idealizat al ansamblului vibrator–teren cu două mase în vibrație [41, 45]**

În cele mai multe cazuri, calculele ansamblului vibrator–teren se efectuează în afara zonei de rezonanță, în special în zona de postrezonanță. Mai târziu se va observa cum se poate neglija rezistența vâscoasă ( $c = 0$ ). În situația dată, modelul compus al pământului Voigt se transformă în modelul simplu Hooke, iar pentru amplitudinile vibrațiilor se utilizează expresii mai simple [45].

Amplitudinea masei  $M_1$  o deducem din expresia (3.40), unde se face  $c = 0$ :

$$A_1 = \frac{P_0 \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right)}{(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right) - \frac{k_2^2}{M_2}} \quad (3.42)$$

Amplitudinea masei  $M_2$  o deducem în mod asemănător din expresia (3.41):

$$A_2 = \frac{P_0 \frac{k_2}{M_2}}{(k_1 + k_2 - M_1\omega^2) \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right) - \frac{k_2^2}{M_2}} \quad (3.43)$$

Pulsațiile de rezonanță reies din condiția ca numitorii expresiilor (3.42) și (3.43) să fi egali cu zero ( $A_1$  și  $A_2$  tind către infinit); obținem o ecuație algebrică de ordinul doi în  $\omega^2$ , care dă două valori ale pulsației de rezonanță [45]:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{(k_1 + 2k_2) \pm \sqrt{k_1^2 + 4k_2^2}}{2M_2} \quad (3.44)$$

în care  $\omega_{1,2}$  sunt pulsațiile forței perturbatoare egale cu pulsațiile proprii  $p_1$  și  $p_2$  ale ansamblului vibrator-teren [45].

La plăcile vibratoare cu două mase în vibrație se impune condiția ca masa superioară  $M_2$  – motorul cu cadrul său suport – să stea cât mai nemișcat în timpul lucrului, pentru ca motorul de antrenare și deserventul plăcii compactoare să nu sufere influența dăunătoare a vibrațiilor [43, 45].

Aceasta se obține prin găsirea unor soluții constructive astfel, încât amplitudinea  $A_2$  să scadă foarte mult, tinzând către 0.

Din formula (3.43) putem observa că amplitudinea  $A_2$  scade când coeficientul de rigiditate  $k_2$  tinde către zero sau când masa  $M_2$  crește mult. Mărimea rigidității  $k_2$  are o limită inferioară, deoarece trebuie să asigure stabilitatea motorului cu cadrul său suport, iar mărimea masei  $M_2$  are o limită superioară din motive constructive.



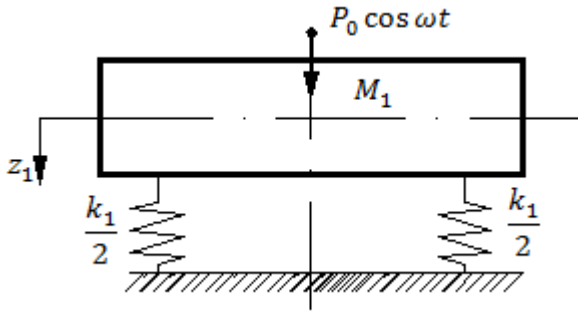
Dacă  $k_2 \rightarrow 0$  și amplitudinea  $A_2 \rightarrow 0$ , formula (3.42) ia forma următoare:

$$A_1 = \frac{P_0}{k_1 - M_1 \omega^2} \quad (3.45)$$

Astfel, expresia (3.45) reprezintă valoarea amplitudinii unui sistem vibrator cu o masă în vibrație de translație verticală, și anume a unui sistem cu un singur grad de libertate (fig. 3.9.). Acest rezultat permite ca în afara zonei de rezonanță ( $\omega \neq p_1, p_2$ ), când sunt îndeplinite condițiile [45]:

$$\begin{aligned} k_2 &\rightarrow 0 \\ M_2 &\gg M_1 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Considerăm mișcarea vibratorie a plăcii, cu cea a unui sistem vibrator cu o singură masă în vibrație de translație pe verticală. Condițiile (3.46) rezultă din cerința constructivă ca masa superioară  $M_2$  să nu ia parte la mișcarea de vibrație a masei inferioare  $M_1$  și să fie ținută la o înălțime constantă față de suprafața pământului.



**Fig. 3.9. Model mecanic idealizat al ansamblului vibrator-teren cu o masă de vibrație [41, 45]**

Pulsatiile proprii ale ansamblului vibrator-teren pentru modelul dinamic al pământului, Hooke (fig. 3.8) [45].

Pentru determinarea acestor pulsații proprii se vor studia vibrațiile libere ale sistemului (3.30) în zona de postrezonanță:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{z}_1 + (k_1 + k_2)z_1 - k_2 \cdot z_2 &= 0 \\ M_2 \ddot{z}_2 + k_2 z_2 - k_2 z_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

În acest caz, căutăm soluții particulare de forma:

$$\begin{aligned} z_1 &= A_1 \cdot \cos(pt - \varphi) \\ z_2 &= A_2 \cdot \cos(pt - \varphi) \end{aligned}$$

Aceste soluții împreună cu derivatele lor de ordinul doi se introduc în sistemul de ecuații (3.47) și după simplificare cu  $\cos(pt - \varphi)$  se obțin următoarele:

$$\begin{aligned} [(k_1 + k_2) - M_1 \cdot p^2] \cdot A_1 - k_2 A_2 &= 0 \\ -k_2 A_1 + (k_2 - M_2 \cdot p^2) A_2 &= 0 \end{aligned}$$

Ecuația pulsațiilor:

$$\begin{vmatrix} (k_1 + k_2) - M_1 p^2 & -k_2 \\ -k_2 & (k_2 - M_2 p^2) \end{vmatrix} = 0$$

sau

$$M_1 \cdot M_2 \cdot p^4 - [(k_1 + k_2) \cdot M_2 + k_2 \cdot M_1] \cdot p^2 + k_1 \cdot k_2 = 0$$

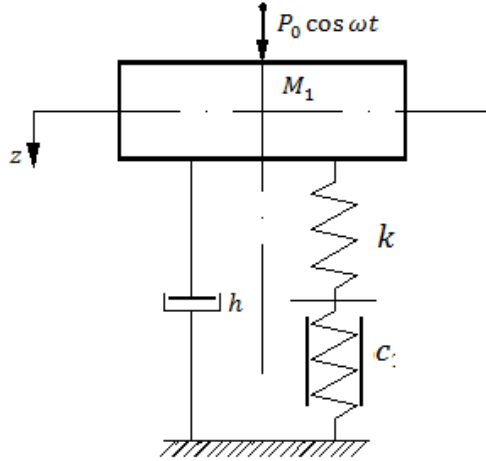
Aplicând condiția  $k_2 = 0$ , din (3.46) obținem:

$$p_1^2 = \frac{k_1}{M_1}$$

Anume, pătratul pulsației proprii a ansamblului organului de lucru-pământ este egal cu raportul dintre rigiditatea pământului și masa în vibrație a organului de lucru.

### 3.3.3. Răspunsul dinamic pentru modelul vâscoelastoplastic

Amplitudinea mișcării vibratorii, în cazul modelului dinamic al pământului, ca fiind vâscoelastoplastic de tip V/(E-P), se caracterizează prin regim stabil de lucru [41, 45] (fig. 3.10).



**Fig. 3.10. Modelul dinamic al ansamblului vibrator-teren cu o singură masă de vibrație, iar al pământului modelat V/(E-P) [41, 45]**

Astfel, în această situație distingem două faze principale de lucru: încărcare și descărcare.

În faza de încărcare modelul compus al pământului V/(E-P) lucrează în mod asemănător cu modelul Voigt V/E cu diferența că în locul constantei elastice simple intervine constanta elastică echivalentă din legarea în serie a arcului normal  $k$  cu arcul cu blocare  $c$ . Pentru a obține valoarea amplitudinii, în cazul dat, este destul ca în formulele (3.40) și (3.41) să schimbăm constanta elastică  $k_1$  model Hooke (E) cu constanta elastică echivalentă:

$$k_e = \frac{k \cdot c}{k + c} \quad (3.48)$$

Astfel, valoarea amplitudinii masei  $M_1$  este  $A_1$  are următoarea formă:

$$A_1 = \frac{P_0}{k_2 - M_2 \omega^2} \quad (3.49)$$

---


$$\sqrt{\left[ \left( \frac{k \cdot c}{k + c} + k_2 - M_1 \omega^2 \right) \cdot (k_2 - M_2 \omega^2) - k_2^2 \right]^2 + h^2 \omega^2 (k_2 - M_2 \omega^2)^2}$$

și amplitudinea masei  $M_2$  este  $A_2$  dată de relația:

$$A_2 = \frac{P_0 \cdot k_2}{\sqrt{\left[\left(\frac{k \cdot c}{k + c} + k_2 - M_1 \omega^2\right) \cdot (k_2 - M_2 \omega^2) - k_2^2\right]^2 + h^2 \omega^2 (k_2 - M_2 \omega^2)^2}} \quad (3.50)$$

### 3.3.4. Răspunsul dinamic pentru modelul elastoplastic E-P

Amplitudinile mișcării vibratorii, în cazul modelului compus E-P [41, 45], se va preciza pentru modelul ansamblului vibrator-teren cu două mase în vibrație și care funcționează în afara zonei de rezonanță. Astfel, influența amortizării este neglijabilă, adică  $h = 0$ , valoarea amplitudinii masei  $M_1$  se va obține dacă în expresia (3.42) se va schimba  $k_e$  cu valoarea sa din (3.48); așadar, avem:

$$A_1 = \frac{P_0 \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right)}{\left(\frac{k \cdot c}{k + c} + k_2 - M_1 \omega^2\right) \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right) - \frac{k_2^2}{M_2}} \quad (3.51)$$

Dacă înlocuim  $k_e$  în expresia (3.43), obținem amplitudinea  $A_2$  sub forma:

$$A_2 = \frac{P_0 \frac{k_2}{M_2}}{\left(\frac{k \cdot c}{k + c} + k_2 - M_1 \omega^2\right) \cdot \left(\frac{k_2}{M_2} - \omega^2\right) - \frac{k_2^2}{M_2}} \quad (3.52)$$

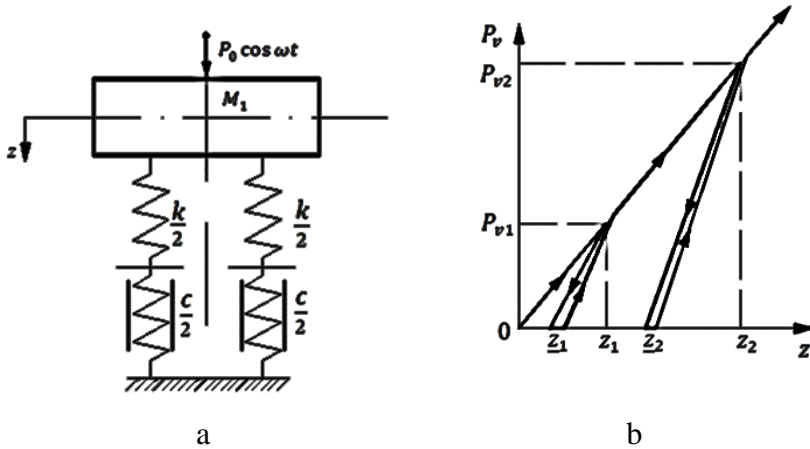
### 3.3.5. Răspunsul dinamic pentru sistemul cu o masă

#### a) Modelul reologic E-P

Amplitudinea sistemului vibrator cu o singură masă, în vibrație de translație verticală, în cazul modelului compus al pământului E-P, va fi caracterizată în funcție de noile condiții [41, 45]. Luând în considerare condițiile din (3.46) care permit să considerăm mișcarea vibratorie a plăcii cu cea a unui sistem cu o masă în vibrație de translație și schimbând în formula (3.45)

valoarea coeficientului de rigiditate  $k$  cu cea din expresia (3.48), obținem expresia amplitudinii masei în vibrație în cazul modelului compus al pământului E-P (fig.3.11) [45]:

$$A_1 = \frac{P_0}{\frac{k \cdot c}{k + c} - M_1 \omega^2} \quad (3.53)$$



**Fig. 3.11. Model dinamic al ansamblului vibrogenerator–pământ cu o singură masă în vibrație unde pământul este modelat E-P: a) reprezentarea simbolică; b) curba caracteristică de deformare liniară a pământului [41, 45]**

La descărcare, modelul V/(E-P) acționează identic cu modelul Voigt, fiindcă arcul cu împănare rămâne blocat. În cazul dat, formulele (3.49), (3.50), (3.51), (3.34) și (3.52) se aplică întocmai, înlocuind  $k_e$  din expresiile date cu  $k$ .

**b) Modelul reologic V/E-P**

Valorile amplitudinii și unghiul de fază al ansamblului vibrator–teren cu o masă în vibrație de translație, unde modelul pământului este V/(E-P) [41, 45], este prezentat în figura 3.10.

Ecuția diferențială a sistemului se cunoaște din (3.30), obținând  $k_2 = 0$  și înlocuind  $k_1$  cu  $k_e$ :

$$M_1 \ddot{z}_1 + h \cdot \dot{z}_1 + k_e \cdot z_1 = P_0 \cdot \cos \omega t \quad (3.54)$$

Astfel, expresia (3.54) redă ecuația diferențială a ansamblului vibrator–teren cu o masă în vibrație de translație verticală și model al pământului V/(E-P) în faza de încărcare. Pentru faza de revenire, când modelul pământului este V/E, se aplică tot ecuația (3.54) în care egalăm  $k_e = k$ .

Se introduc următoarele notații:

$$\begin{aligned} 2n_1 &= \frac{h}{M_1} \\ p_1^2 &= \frac{k_e}{M_1}; \quad p_1^2 = \frac{k \cdot c}{M_1 \cdot (k + c)} \\ r_1 &= \frac{\omega}{p_1} \\ s_1 &= \frac{n_1}{p_1}; \quad s_1 = \frac{h}{h_c} \end{aligned} \quad (3.55)$$

în care:  $n_1$  – coeficientul de amortizare redus;  
 $s_1$  – coeficientul de amortizare relativă;  
 $h_c$  – coeficientul de amortizare critică;  
 $r_1$  – raportul pulsațiilor;  
 $p_1$  – pulsația proprie a ansamblului masă inferioară placă–teren.

Astfel, ecuația (3.54) se mai poate scrie sub forma:

$$\ddot{z}_1 + 2n_1 \cdot \dot{z}_1 + p_1^2 \cdot z_1 = \frac{P_0}{M_1} \cdot \cos \omega t \quad (3.56)$$

Referitor la rezolvarea ecuației diferențiale (3.56), luând în considerare faptul că analizăm sistemul în regimul de lucru permanent și, prin urmare, ne interesează numai vibrația forțată care rămâne, examinăm o soluție particulară sub următoarea formă:

$$z_1 = C_1 \cdot \cos \omega t + C_2 \cdot \sin \omega t \quad (3.57)$$

Așadar, calculăm derivatele întâi și a doua și împreună cu soluția (3.57) le integrăm în ecuația (3.56). Se grupează termenii după  $\cos \omega t$  și  $\sin \omega t$ . Concluzionăm că ecuația reprezintă doi vectori defazați cu  $\frac{\pi}{2}$  din egalitatea modulelor și obținem:

$$\begin{aligned}(p_1^2 - \omega^2) \cdot C_1 + 2n_1 \omega C_2 &= \frac{P_0}{M_1} \\ -2n_1 \omega C_1 + (p_1^2 - \omega^2) \cdot C_2 &= 0\end{aligned}\tag{3.58}$$

Cu rezolvarea sistemului (3.58), obținem valorile constantelor de integrare:

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{P_0}{M_1} \cdot \frac{p_1^2 - \omega^2}{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2} \\ C_2 &= \frac{P_0}{M_1} \cdot \frac{2n_1 \cdot \omega}{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2}\end{aligned}\tag{3.59}$$

unde notăm:

$$\begin{aligned}C_1 &= A_1 \cdot \cos \varphi_1 \\ C_2 &= A_1 \cdot \sin \varphi_1\end{aligned}\tag{3.60}$$

Înlocuim notațiile (3.60) în expresia (3.57), unde se obține soluția ecuației diferențiale (3.54) sub următoarea formă:

$$z_1 = A_1 \cdot \cos(\omega t - \varphi_1)\tag{3.61}$$

în care  $\varphi_1$  este unghiul de fază la originea timpului.

Se schimbă constantele  $C_1$  și  $C_2$  în relația dedusă din (3.60) din care rezultă expresia amplitudinii:

$$\begin{aligned}A_1 &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \\ A_1 &= \frac{P_0}{M_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2}}\end{aligned}\tag{3.62}$$

Se introduce  $M_1$  sub radical, înlocuind  $p_1$  și  $n_1$  cu valorile lor din (3.55) și se obține:

$$A_1 = \frac{P_0}{\sqrt{(k_e - M_1 \cdot \omega^2)^2 + h^2 \cdot \omega^2}}\tag{3.63}$$

Atunci în expresia (3.62) se scoate  $p_1^2$  factor comun la radical și înlocuind raporturile  $\frac{\omega}{p_1}$  și  $\frac{n_1}{p_1}$  cu valorile lor din (3.55) obținem:

$$A_1 = \frac{P_0}{k_e} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - r_1^2)^2 + 4s_1^2 \cdot r_1^2}}$$

care o mai putem scrie sub forma:

$$A_1 = A_{st} \cdot \lambda d_1 \quad (3.64)$$

în care:

$$A_{st} = \frac{P_0}{k_e} \quad (3.65)$$

$$\lambda d_1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - r_1^2)^2 + 4s_1^2 \cdot r_1^2}} \quad (3.66)$$

unde:  $A_{st}$  - deformația statică produsă de forța  $F_0$  aplicată în regim static elementelor elastice de constanta  $k_e$  la  $\omega = 0$ ;

$\lambda d_1$  - coeficientul dinamic al amplitudinii.

Pentru valori mai mici ale pulsației  $\omega$ , respectiv  $\frac{\omega}{p_1} \cong 0$ , coeficientul dinamic  $\lambda d_1 = 1$ , atunci amplitudinea vibrației este aproximativ egală cu  $A_{st}$ .

Când amplitudinea  $P_0$  a forței perturbatoare se află în funcție de pulsația  $\omega$ , respectiv  $P_0 = m \cdot e \cdot \omega^2$ , amplitudinea vibrației  $A_1$  din (3.62) obținem:

$$A_1 = \frac{m \cdot e}{M_1} \cdot \frac{r_1^2}{\sqrt{(1 - r_1^2)^2 + 4s_1^2 \cdot r_1^2}}$$

care mai poate fi scrisă:

$$A_1 = A_0 \chi_1$$

sau

$$A_1 = \frac{M_{st}}{G_1} \chi_1 \quad (3.67)$$



în care:

$$A_0 = \frac{m \cdot e}{M_1} = \frac{G_0 \cdot e}{G_1} \quad (3.68)$$

$$M_{st} = m \cdot g \cdot e = G_0 \cdot e \quad (3.69)$$

$$\chi_1 = \frac{r_1^2}{\sqrt{(1 - r_1^2)^2 + 4s_1^2 \cdot r_1^2}} \quad (3.70)$$

$A_0$  - amplitudinea vibrației pentru valori foarte mari ale lui  $\omega$  (în lipsa rezistențelor elastice și vâscoase);  $G_0$  - greutatea excentricelor;  $M_{st}$  - momentul static al excentricelor;  $\chi_1$  - coeficientul de amplificare al amplitudinii părții inferioare a plăcii;  $G_1$  - greutatea părții inferioare a plăcii.

Luând în considerare valoarea lui  $A_1$  din (3.63), soluția (3.61) se transformă astfel:

$$z_1 = \frac{P_0}{\sqrt{(k_e - M_1 \cdot \omega^2)^2 + h^2 \cdot \omega^2}} \cdot \cos(\omega t - \varphi_1) \quad (3.71)$$

Unghiul de fază se determină din (3.69) și (3.68):

$$\sin \varphi_1 = \frac{2n_1 \omega}{\sqrt{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2}} \quad (3.72)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{p_1^2 - \omega^2}{\sqrt{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4n_1^2 \omega^2}} \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{2n_1 \omega}{p_1^2 - \omega^2} \\ \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{h\omega}{k_e - M_1 \omega^2} \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{2s_1 r_1}{1 - r_1^2}$$

Astfel, în faza de descărcare se utilizează formulele determinate pentru modelul pământului Voigt (V/E), care se identifică în expresiile obținute pentru faza de încărcare, în care

înlocuim constanta elastică echivalentă  $k_e$  cu constanta elastică simplă  $k$ .

*Valorile unghiului de fază și ale amplitudinii, în zona postrezonanță, în care modelul dinamic al pământului este E-P.*

Fiindcă  $h = 0$ , rezultă  $n_1 = 0$ ,  $s_1 = 0$ .

Ecuția diferențială (3.56) are următoarea formă:

$$\ddot{z}_1 + p_1^2 z_1 = \frac{P_0}{M_1} \cos \omega t \quad (3.75)$$

Valorile amplitudinii din (3.62), (3.63), (3.64):

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{P_0}{M_1} \cdot \frac{1}{p_1^2 - \omega^2} \\ A_1 &= \frac{P_0}{k_e - M_1 \omega^2} \\ A_1 &= \frac{P_0}{k_e} \cdot \frac{1}{1 - r_1^2} = \frac{P_0}{k_e} \cdot \frac{1}{1 - \frac{M_1}{k_e} \omega^2} \\ A_1 &= A_0 \frac{r_1^2}{1 - r_1^2} = A_0 \frac{\omega^2}{p_1^2 - \omega^2} \\ \lambda d_1 &= \frac{1}{1 - r_1^2} \\ \chi_1 &= \frac{r_1^2}{1 - r_1^2} \end{aligned} \quad (3.76)$$

Unghiul de fază la origine:

$$\sin \varphi_1 = 0; \quad \cos \varphi_1 = -1$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0$$

$$\varphi_1 = \pi$$

### 3.4. Vibrația combinată de translație verticală și rotație în jurul axei transversale orizontale

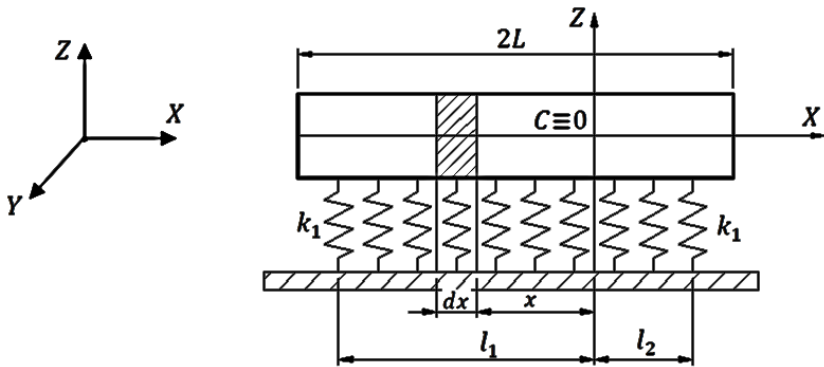
#### 3.4.1. Modelul dinamic al sistemului compactor vibrator–teren

Admitem acum sistemul cu o singură masă în vibrație, unde vibrează numai masa inferioară  $M_1$  cu vibrații dirijate și eliminăm

una dintre presupunerile de la începutul acestui capitol cu menirea că în afara vibrației de translație verticală ținem cont și de vibrația de rotație în jurul axei orizontale transversale a plăcii [41, 45]. Astfel, ansamblul compactor vibrator–teren se reprezintă sub forma unui sistem vibrator cu o singură masă în vibrație, având însă două grade de libertate [45].

Ținem cont de modelul dinamic al pământului Hooke (E), dar această modelare o executăm printr-un număr mare de arcuri elicoidale dispuse în mod continuu (fig. 3.12), toate având aceeași rigiditate. Lucrul dat este impus de acțiunea prin intervenția mișcării vibratorii de rotație, arcurile elicoidale căpătând deformații diferite, în funcție de distanța la care se regăsesc față de axa de rotație [45].

Așadar, în dependență de lungimea tălpii în contact cu pământul, considerăm că „arcurile elicoidale” sunt uniform repartizate pe întreaga suprafață, iar rigiditatea  $k_1$  va avea o distribuție liniară exprimată în  $\frac{N}{m} \cdot \frac{1}{m} = \frac{N}{m^2}$  care se numește rigiditate specifică [45].



**Fig. 3.12. Compactorul vibrator este în contact permanent cu pământul modelat mecanic de un număr mare de „arcuri elicoidale” [41, 45]**

Compactor vibrator poate fi talpa plăcii vibratoare sau cilindrul unui rulou vibrator ce vor fi interpretate sub forma unui paralelipiped dreptunghic, care are elevația unui dreptunghi de lungime  $L$  și înălțime  $H$ ; lățimea plăcii se va nota cu  $B$  și se va eticheta în acest caz egală cu unitatea de măsură a lui  $L$  și  $H$  [45].

### 3.4.2. *Pulsațiile proprii ale ansamblului compactor vibrator-teren*

Pentru determinarea pulsațiilor proprii se vor studia vibrațiile libere ale sistemului [37, 45]. Considerăm un element în elevație  $dx$  plasat la distanța  $x$  de axa de rotație transversală  $CY$  și se selectează ca parametri instantanei coordonata  $Z = Z(A)$  a centrului de masă și coordonata unghiulară  $\beta = \beta(t)$  alcătuită de axa longitudinală  $OX$  cu orizontala pe care este așezat compactorul, anume cu suprafața pământului. Dacă izolăm  $M_1$  și se aplică forțele și momentele de legătură (fig. 3.13) se pot deduce următoarele:

- forța elastică cauzată de translației verticale cu coordonata instantanee  $z$  se realizează în modul următor:

$$dF_z = -k_1 dx \cdot z$$

$$F_z = \int_{-l_1}^{+l_2} dF_z = -k_1 \cdot z \cdot \int_{-l_1}^{+l_2} dx \quad (3.77)$$

$$F_z = -k_1 \cdot z \cdot (l_1 + l_2)$$

- forța elastică cauzată de rotația cu coordonata unghiulară instantanee  $\beta$  reiese din parcurgerea următoarelor etape în modul dat:

$$dF_\beta = +k_1 \cdot dx \cdot x \cdot \beta$$

$$F_\beta = \int_{-l_1}^{+l_2} dF_\beta = +k_1 \cdot \beta \cdot \int_{-l_1}^{+l_2} x dx \quad (3.78)$$

$$F_\beta = +k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} \quad (3.79)$$

$$dM_\beta = -k_1 \cdot dx \cdot x \cdot \beta \cdot x \quad (3.80)$$

$$\mathcal{M}_\beta = \int_{-l_1}^{+l_2} d\mathcal{M}_\beta = -k_1 \cdot \beta \cdot \int_{-l_1}^{+l_2} x^2 dx$$

$$\mathcal{M}_\beta = -k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^3 + l_2^3}{2}$$

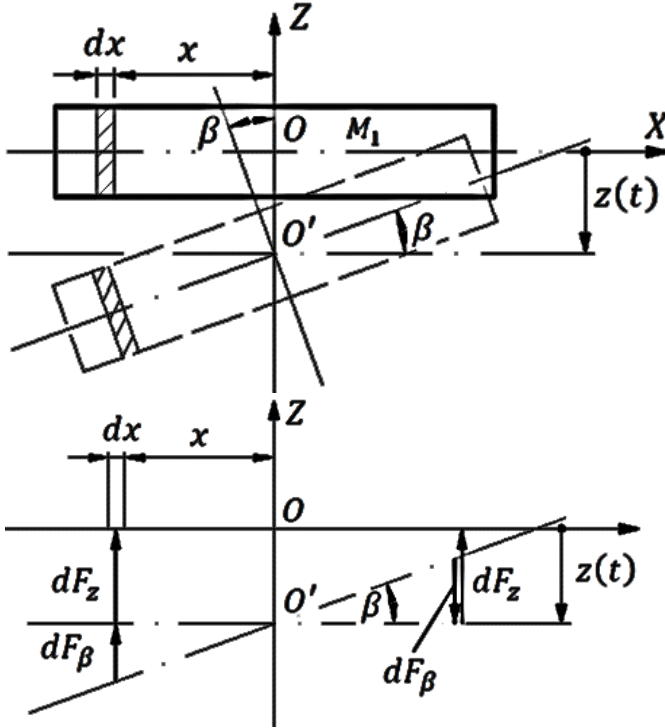


Fig. 3.13. Schema forțelor și momentelor de legătură [37, 45]

Ecuțiile de mișcare ce arată comportarea dinamică a sistemului compactor vibrator-teren pot fi scrise sub următoarea formă:

$$M_1 \ddot{z} = -k_1 \cdot z \cdot (l_1 + l_2) - k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^2 - l_2^2}{2}$$

$$J_1 \ddot{\beta} = -k_1 \cdot z \cdot \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} - k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^3 + l_2^3}{3}$$

sau

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{z} + k_1 \cdot z \cdot (l_1 + l_2) + k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} &= 0 \\ J_1 \ddot{\beta} + k_1 \cdot \beta \cdot \frac{l_1^3 + l_2^3}{3} + k_1 \cdot z \cdot \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.81)$$

în care  $k_1$  este rigiditatea arcurilor elicoidale uniform repartizate pe unitatea de lungime a tălpii;

$\beta$  – unghiul de rotație pe care îl face axa sa longitudinală cu orizontala;

$dx$  – elementul de placă în elevație;

$z$  – deplasarea instantanee a centrului de masă;

$x$  – distanța elementului  $dx$  la axa de rotație transversală;

$l_1$  – distanța pe care sunt dispuse „arcurile elicoidale” în partea stângă a axei de rotație transversală;

$l_2$  – distanța pe care sunt dispuse „arcurile elicoidale” în partea dreaptă a axei de rotație transversală;

$M_1$  – masa compactorului;

$J_1$  – momentul de inerție în raport cu axa transversală, OY.

Pentru explicarea sistemului (3.81) analizăm soluții particulare de forma:

$$\begin{aligned} z &= A_t \cdot \cos(p \cdot t - \varphi) \\ \beta &= A_r \cdot \cos(p \cdot t - \varphi) \end{aligned} \quad (3.82)$$

unde:  $A_t$  – amplitudinea mișcării vibratorii de translație verticală;

$A_r$  – amplitudinea mișcării vibratorii de rotație;

$p$  – pulsația proprie;

$\varphi$  – faza la originea timpului.

Realizăm derivatele întâi și a doua și în comun cu soluțiile (3.82) le includem în sistemul (3.81). Simplificând cu  $\cos(p \cdot t - \varphi)$  și grupând termenii după  $A_t$  și  $A_r$ , obținem două ecuații algebrice omogene:

$$\begin{aligned}
 [k_1(l_1 + l_2) - M_1 \cdot p^2]A_t + k_1 \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} \cdot A_r &= 0 \\
 k_1 \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} \cdot A_t + \left[ k_1 \frac{l_1^3 + l_2^3}{3} - J_1 p^2 \right] \cdot A_r &= 0
 \end{aligned} \tag{3.83}$$

Ca mișcarea vibratorie să existe, determinantul sistemului algebric trebuie să fie nul:

$$\Delta(p^2) = \begin{vmatrix} k_1(l_1 + l_2) - M_1 \cdot p^2 & k_1 \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} \\ k_1 \frac{l_1^2 - l_2^2}{2} & k_1 \frac{l_1^3 + l_2^3}{3} - J_1 p^2 \end{vmatrix} = 0 \tag{3.84}$$

În cazul în care determinantul este dezvoltat, se obține o ecuație caracteristică a pulsațiilor proprii sub următoarea formă:

$$\begin{aligned}
 p^4 - \left[ \frac{k_1(l_1 + l_2)}{M_1} + \frac{k_1(l_1^3 + l_2^3)}{3J_1} \right] \cdot p^2 \\
 + \frac{k_1(l_1 + l_2)}{M_1} \cdot \frac{k_1(l_1^3 + l_2^3)}{3J_1} - \frac{k_1^2(l_1^2 - l_2^2)^2}{4M_1J_1} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.85}$$

Introducem următoarele notații convenționale pentru o mai bună structurare a ecuației și obținem:

$$\begin{aligned}
 \frac{k_1(l_1 + l_2)}{M_1} &= p_t^2 \\
 \frac{k_1(l_1^3 + l_2^3)}{3J_1} &= p_r^2 \\
 \frac{k_1(l_1^2 - l_2^2)^2}{2\sqrt{M_1J_1}} &= p_k^2
 \end{aligned} \tag{3.86}$$

unde:  $p_t$  – pulsația naturală a mișcării vibratorii de translație verticală;

$p_r$  – pulsația naturală a mișcării vibratorii de rotație;

$p_k$  – pulsația de cuplare a mișcărilor de translație și rotație.

Cu notațiile introduse ecuația pulsațiilor (3.84) devine:

$$p^4 - (p_t^2 + p_r^2)p^2 + (p_t^2 \cdot p_r^2 - p_k^4) = 0 \quad (3.87)$$

Soluțiile ecuației (3.86) redau pulsațiile proprii ale sistemului și au forma următoare:

$$p_{1,2} = \frac{p_t^2 + p_r^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p_t^2 + p_r^2}{2}\right)^2 - (p_t^2 \cdot p_r^2 - p_k^4)}$$

sau

$$p_{1,2} = \frac{p_t^2 + p_r^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p_t^2 - p_r^2}{2}\right)^2 + p_k^4} \quad (3.88)$$

Reiese că sistemul de ecuații (3.81), care redau două vibrații cuplate, are două pulsații proprii ce depind de pulsațiile naturale  $p_t$ ,  $p_r$  și de factorul de cuplaj  $p_k$ , respectiv de  $(l_1^2 - l_2^2)$  [45].

Când  $p_k^4 = 0$ , rădăcinile ecuației (3.87) se restrâng la pulsațiile naturale. Cu alte cuvinte, au două moduri proprii, cele două mișcări sunt decuplate:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_t \\ p_2 &= p_r \end{aligned} \quad (3.89)$$

Factorul de decuplare a celor două mișcări vibratorii se explică fizic prin aceea ca mișcarea vibratorie de translație să nu excite mișcarea vibratorie de rotație și nici invers. Astfel, condiția de decuplare poate fi realizată numai când  $p_k = 0$  și numai când este îndeplinită relația:

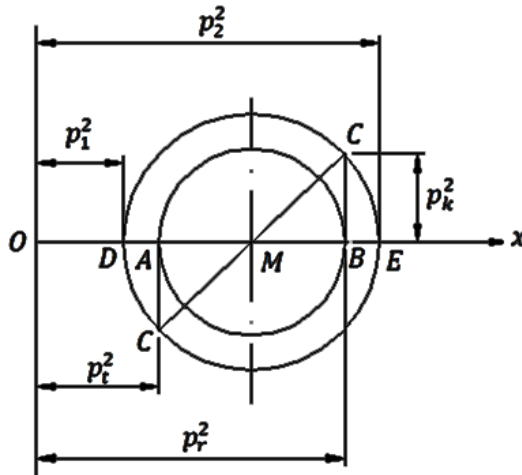
$$l_1^2 - l_2^2 = 0, \text{ sau } l_1 = l_2 \quad (3.90)$$

Anume centrul maselor se găsește pe axa verticală de simetrie a compactorului în contact cu pământul. Din punct de vedere constructiv, prin amplasarea elementelor componente ale compactorului soluția este ca centrul de masă al compactorului să se găsească pe axa verticală de simetrie a acestuia. Practic, dacă condiția de decuplare (3.90) este îndeplinită, energia mișcării vibratorii de translație nu se transmite mișcării vibratorii de rotație. Aceasta înseamnă că dacă în timpul lucrului compactorului se



produce o mișcare vibratorie de rotație liberă a acestuia, aceasta se amortizează într-un timp scurt, deoarece nu este alimentată energetic de mișcarea staționară și forțată de translație pe verticală.

Așadar, reprezentarea grafică a ecuației pulsațiilor proprii poate fi realizată prin construirea unui „cerc al pulsațiilor” proprii similar „cercului Mohr pentru starea de tensiuni” (fig. 3.14).



**Fig. 3.14. Reprezentarea grafică a pulsațiilor proprii similar „cercului Mohr” [39, 45]**

Pe axa  $O_x$  luăm segmentele  $OA = p_t^2$ ,  $OB = p_r^2$  și perpendicular pe ea segmentul  $BC = p_k^2$ . Din centrul  $M$ , care este mijlocul segmentului  $AB$ , se face cercul de rază  $MC$  care taie axa  $O_x$  în punctele  $D$  și  $E$ . Astfel, rezultă grafic pulsațiile proprii  $p_1^2 = OD$  și  $p_2^2 = OE$ .

Când factorul de cuplaj este nul ( $p_k = 0$ ), cercul lui Mohr se reduce la cercul descris pe  $AB$  ca diametru; deci,  $p_1^2 = p_t^2$  și  $p_2^2 = p_r^2$ .

Influența raportului pulsațiilor naturale asupra lungimii și înălțimii compactorului în cazul decuplării poate fi analizată numai

când compactorul are simetrie geometrică, iar configurația geometrică este paralelipipedică.

Condiția de decuplare (3.90), fiind îndeplinită, valorile pulsațiilor naturale ale mișcărilor vibratorii de translație și rotație pot fi atinse numai pentru cazul:

$$l_1 = l_2 = \frac{L}{2} \quad (3.91)$$

Astfel, pulsațiile naturale modale sunt:

$$\begin{aligned} p_t^2 &= \frac{k_1 L}{M_1} \\ p_r^2 &= \frac{k_1 L^3}{12J_1} \end{aligned} \quad (3.92)$$

Atunci raportul pulsațiilor naturale are forma:

$$\frac{p_t^2}{p_r^2} = \frac{12}{L^2} \cdot \frac{J_1}{M_1} \quad (3.93)$$

Introducem raza de girație  $j$  dată de relația:

$$\frac{J_1}{M_1} = j^2 \quad (3.94)$$

Expresia (3.93), în funcție de  $j$ , poate fi scrisă astfel:

$$j^2 = \frac{L^2}{12} \cdot \frac{p_t^2}{p_r^2} \quad (3.95)$$

Dacă raportul  $\frac{p_t}{p_r} \equiv 1$ , obținem:

$$j^2 = \frac{L^2}{12} \quad (3.96)$$

Dacă raportul  $\frac{p_t^2}{p_r^2} > 1$ , obținem:

$$j^2 > \frac{L^2}{12} \quad (3.97)$$

Dacă urmărim ca pulsația, respectiv frecvența mișcării vibratorii de translație verticală, să fie mai mari decât cele de rotație, trebuie să se urmărească ca condiția (3.97) să fie îndeplinită.

Momentul de inerție polar al elevației compactorului reprezentat în secțiune dreptunghiulară este:

$$J_1 = M_1 \cdot \frac{L^2 + H^2}{12} \quad (3.98)$$

Înlocuind valoarea momentului de inerție polar din (3.98) în expresia (3.93), observăm că raportul pulsațiilor naturale devine:

$$\frac{p_t^2}{p_r^2} = 1 + \left(\frac{H}{L}\right)^2 \quad (3.99)$$

Cum H este mai mare ca zero, rezultă că oricare ar fi valoarea înălțimii compactatului, pulsația respectiv frecvența mișcării vibratorii de translație verticală, va fi totdeauna mai mare decât a celei de rotație:

$$p_t > p_r \quad (3.100)$$

Influența înălțimii H [43, 45] a compactorului echivalent cu corpul paralelipedic asupra raportului pulsațiilor naturale este analizată astfel:

**a)** cazul pentru care avem:

$$H \cong \frac{L}{4} \quad (3.101)$$

Dacă introducem valoarea (3.101) în expresia (3.99), obținem:

$$\frac{p_t^2}{p_r^2} = \frac{17}{16} \cong 1 \quad (3.102)$$

Reiese că influența lui H asupra raportului pulsațiilor naturale este neglijabilă.

**b)** cazul pentru care avem:

$$H = L \quad (3.103)$$

obținem raportul  $\frac{p_t^2}{p_r^2} = 2$  din care reiese:

$$p_t = p_r \sqrt{2} \quad (3.104)$$

Luând în considerare faptul că H nu are influență semnificativă asupra raportului pulsațiilor naturale de relația

(3.100), este obligatoriu a evita fenomenul de rezonanță. Astfel, condiția poate fi scrisă:

$$\omega > p_t \quad (3.105)$$

care înseamnă că pulsația forței perturbatoare trebuie să fie mai mare decât pulsația mișcării vibratorii de translație verticală și să se evite fenomenul de rezonanță cu mișcarea vibratorie de rotație.

Conform realizărilor mai multor teste, se propune pentru raportul pulsațiilor  $\frac{\omega}{p_t}$  respectarea condiției [43, 45]:

$$\Omega = r = \frac{\omega}{p_t} = 1,5 \div 4 \quad (3.106)$$

și anume, pentru funcționarea în postrezonanță.

Cu aplicarea condiției (3.106) se respectă cerințele (3.91) de decuplare, (3.97) care impun ca pulsația proprie a mișcării vibratorii de translație verticală să fie mai mare decât a celei de rotație și (3.105) unde se impune condiția ca pulsația forței perturbatoare să fie mai mare decât pulsația mișcării vibratorii de translație verticală, pentru a se evita fenomenul de rezonanță cu mișcarea vibratorie de rotație.

Astfel, condiția (3.106) impune ca mișcarea compactorului să fie în zona de postrezonanță.

Valoarea minimă  $\Omega = r = 1,5$  [43, 45] este determinată din condiția ca  $\omega > p\sqrt{2}$  pentru a avea o mai bună transmisibilitate a forței perturbatoare, iar valoarea maximă  $\Omega = r = 4$  este recomandată pentru limitarea frecvenței.

## ANALIZA PARAMETRILOR DE CONTACT RULOU COMPACTOR-PĂMÂNT

Efectul contactului rulou-pământ are la bază acțiunea eficientă a utilajului permanent. Aceasta impune ca procesul de compactare să finalizeze înainte ca valoarea de prag pentru rigiditatea pământului să fie atinsă, și anume, să nu se producă funcționarea utilajului cu desprindere de teren.

Pentru analizarea procesului de compactare a pământului a fost conceput un model de interacțiune utilaj-teren obșigatoriu în ipoteza generală a menținerii contactului cu terenul pe toată durata acestui proces, utilizând observațiile fenomenologice, sintetizate în capitolele anterioare, și rezultatele prelucrării parțiale a testelor experimentale în conformitate cu „Caietul 1 al Normativului privind îmbunătățirea terenurilor de fundare slabe, prin procedee mecanice, Indicativ C 29-1991” [11]\*\*.\*.

În acest capitol, în special, se va evidenția evoluția parametrilor ce caracterizează starea pământului, apreciind că parametrii utilajului sunt stabili, în limitele domeniilor de adaptare necesare, impuse de necesitățile finalizării corecte a procesului de compactare pentru tipul de pământ care este studiat, ceea ce se potrivește cu situația în care utilajul de compactare a fost corect selectat în raport cu sarcina tehnologică de compactare [46].

### 4.1. Modulul static de deformare liniară a pământului

Determinările experimentale pentru stabilirea modulului static de deformare liniară  $E_{st}$  a pământului și a densității sale în stare uscată  $\rho_d$  au sesizat existența unei corelații între valorile acestor doi parametri caracteristici ai acestuia. Tipurile principale de terenuri de fundare, cu umidități corespunzătoare,  $W$ , des întâlnite sunt [46]:

- nisip, pământuri necoezive:  $W = (5...12)\%$ ;
- pământuri slab coezive:  $W = (12...15)\%$ ;
- balast.

S-au determinat expresiile matematice corespunzătoare  $E_{st} = f(\rho_d)$ , pe domeniul fizic real de existență, varianta finală fiind selectată pe baza criteriului erorii minime pe domeniul de existență.

Așadar, pentru aceste tipuri principale de pământuri enumerate se cunosc următoarele expresii pentru funcțiile  $E_{st} = f(\rho_d)$ , și anume:

- pentru nisip sau pământuri necoezive:

$$E_{st} = 937\rho_d - 1175, [daN/cm^2]; (*) \quad (4.1)$$

- pentru pământuri slab coezive:

$$E_{st} = 711,221(1 - 1,3154\sqrt{1,8386 - \rho_d}), [daN/cm^2]; (*) \quad (4.2)$$

- pentru balast:

$$E_{st} = 206,289 \rho_d^2 - 312,413, [daN/cm^2], (*) \quad (4.3)$$

în care:  $E_{st}$  este modulul static mediu de deformație liniară al pământului, în  $[daN/cm^2]$ ;

$\rho_d$  - densitatea uscată medie a pământului realizată la un moment dat, în  $[g/cm^3]$ .

(\*) De precizat:  $1 daN/cm^2 = 10^{-1} MPa$  sau  $1 daN/cm^2 = 10^2 kN/m^2$

Curbele  $E_{st} - \rho_d$  corespunzătoare relațiilor (4.1), (4.2) și (4.3) sunt reprezentate în diagrama din figura 4.1.

În literatura de specialitate, gradul de compactare a solului se caracterizează cu ajutorul următoarei relații [46]:

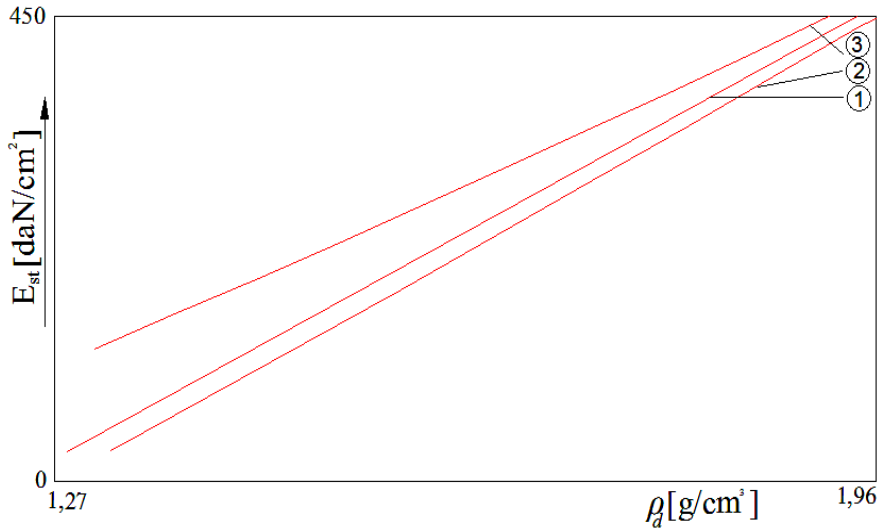
$$D_c = \rho_d / \rho_{d \max}, \quad (4.4)$$

sau

$$D_c = \left( 100 \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \right), [\%], \quad (4.5)$$

în care  $D_c$  este gradul de compactare a pământului, adimensional sau în  $[\%]$ ;

$\rho_{dmax}$  este densitatea maximă în stare uscată, caracteristic pentru fiecare tip de pământ, determinată prin încercarea Proctor, măsurată în  $[g/cm^3]$ .



**Fig. 4.1. Dependența modului static de deformație liniară în funcție de densitatea în stare uscată, și anume 1 - pentru nisip, pământuri necoezive; 2 - pentru pământuri slab coezive; 3 - balast.**

Pe baza acestui indicator al eficienței procesului de compactare sunt stabilite funcțiile de variație ale celorlalți parametri specifici acestui proces tehnologic [46].

#### **4.2. Lățimea amprentei de contact dintre rulou și teren în dependență de densitatea în stare uscată a pământului**

Până în prezent determinările experimentărilor efectuate în situații de șantier, având diferite tipuri de fundare, au arătat existența unei dependențe dintre mărimea „urmei” lăsată de către ruloul mașinii compactoare și asupra gradului de compactare care este

efectuat în teren. Între contactul dintre ruloul utilajului de compactare și pământ, la acțiunea masei mașinii, se realizează o deformare a terenului pe toată lungimea ruloului, care mai este numită amprenta sau pata de contact a utilajului. Astfel, pentru utilajul staționar acesta are, în proiecție pe planul orizontal, forma unui dreptunghi cu latura mare egală cu lungimea  $B$  a ruloului și o lățime dependentă de diametrul  $D_r$  al ruloului și de starea de îndesare existentă a pământului [46].

Determinările experimentale au stabilit că lățimea  $b^*$  a amprentei ruloului la contactul cu pământul se înscrie în domeniul de valori:

$$b^* = (0,1 \dots 0,2)D_r . \quad (4.6)$$

$D_c$  are valori cuprinse în intervalul  $D_c = 0,7 \dots 0,9$ , la fel și faptul că valorile lățimii  $b^*$  ale amprentei utilajului variază invers proporțional cu cele ale gradului de compactare  $D_c$ , fiecare în cadrul intervalelor de variație aferente lor ( $b^*$  scade în intervalul său la creșterea lui  $D_c$  în intervalul aferent acestuia din urmă).

Între parametrii  $b^*$ ,  $D_c$  și  $D_r$  se poate stabili o relație matematică de legătură obținută prin interpolare liniară de forma:

$$b^* = 0,667(1 - D_c)D_r \text{ [cm]} \quad (4.7)$$

sau

$$b^* = 0,667(1 - \rho_d/\rho_{d \max})D_r \text{ [cm]}. \quad (4.8)$$

### 4.3. Grosimea optimă a stratului de pământ compactat

Până în prezent, determinările experimentale efectuate pentru diferite tipuri de terenuri au arătat că există o grosime optimă  $h_c$  a stratului de pământ pentru care compactarea are o eficiență sporită, iar valoarea să poate fi corelată cu lățimea amprentei utilajului și cu gradul de compactare efectiv îndeplinit pe teren [46]. Acest proces de compactare a pământului, având un efect local, eficiența sa la adâncime este limitată, fapt pentru care grosimea stratului de pământ supus compactării nu poate depăși o valoare-limită superioară pentru o compactare eficientă. În acest mod,



experimental s-a stabilit că această grosime optimă  $h_c$  se înscrie în domeniul de valori:

$$h_c = (1,5 \dots 2,0)b^*, \quad (4.9)$$

unde  $D_c = 0,7 \dots 0,9$ , așa cum și faptul că valorile grosimii  $h_c$  optime ale stratului care se compactează variază invers proporțional cu cele ale gradului de compactare  $D_c$ , fiecare în gradul intervalelor de variație aferente lor ( $h_c$  scade în limitele domeniului său când gradul de compactare  $D_c$  crește între limitele intervalului său de variație).

Pe baza interpolărilor liniare se pot stabili relații de interdependență între parametrii specifici procesului de compactare, și anume sub forma:

$$h_c = 0,667(1 - D_c)b^* \text{ [cm]}, \quad (4.10)$$

$$h_c = 4,44(1 - D_c)^2 D_r \text{ [cm]}, \quad (4.11)$$

$$h_c = 4,44(1 - \rho_d/\rho_{d \max})^2 D_r \text{ [cm]}. \quad (4.12)$$

#### 4.4. Tasarea stratului de pământ

Pe baza observațiilor experimentale s-a stabilit că valoarea grosimii optime a stratului de pământ care trebuie compactat scade odată ce procesul de compactare avansată. La fel, s-a constatat și faptul că tasarea pământului  $\Delta h$  în timpul procesului de compactare are aceeași evoluție celei corespunzătoare grosimii optime a stratului de compactat, valoarea sa tinde spre valoarea zero [46]. Dacă considerăm că procesul de compactare se desfășoară în condiții optime, tasarea pământului în acest caz se definește prin relația:

$$\Delta h = h_{Ci} - h_c, \quad (4.13)$$

în care:  $\Delta h$  este tasarea la un moment dat, în [cm];

$h_{Ci}$  - grosimea inițială a stratului de pământ;

$h_c$  - grosimea stratului de pământ care se compactează, la momentul considerat, în [cm].

Deci, tasarea o putem exprima în funcție de densitatea efectiv realizată a pământului la momentul considerat prin expresia următoare:

$$\Delta h = \frac{4,44 \cdot D_r}{\rho_{dmax}^2} \cdot (\rho_{di} - \rho_d) \cdot (\rho_{di} + \rho_d - 2 \cdot \rho_{dmax}) \text{ [cm]}. \quad (4.14)$$

Astfel, după relația de legătură dintre tasarea realizată a pământului și densitatea sa în stare uscată, obținem:

- valoarea tasării realizate la un moment dat, pentru un teren caracterizat prin  $\rho_{dmax}$ , depinde de starea sa inițială de îndesare (prin valoarea densității inițiale în stare uscată  $\rho_{di}$  a pământului);

- tasarea realizată la un moment dat este dependentă de forma și de mărimea organului de lucru activ al utilajului de compactare evidențiate;

- în cazul compactării prin rulare și vibrație, prin diametrul  $D_r$  al ruloului mașinii de compactare.

Corelația stabilită între tasarea  $\Delta h$  a terenului și densitatea în stare uscată realizată a acestuia, exprimată matematic prin relația (4.14), permite de asemenea și stabilirea corelației inverse. Dezvoltând relația (4.14), se obține o ecuație de gradul doi în  $\rho_d$ , având tasarea  $\Delta h$  ca parametru, care prin rezolvare oferă o soluție cu semnificație fizică corectă, exprimată prin relația următoare:

$$\rho_d = \rho_{dmax} - \sqrt{(\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 - 0,225 \cdot \frac{\rho^2 dmax}{D_r} \cdot \Delta h}, \text{ [g/cm}^3\text{]}. \quad (4.15)$$

Din condiția de existență a soluțiilor reale ale ecuației de gradul doi în  $\rho_d$  rezultă, de asemenea, valoarea tasării maxime care poate fi realizată în condițiile în care procesul de compactare a terenului începe de la un grad inițial de compactare  $D_{ci}$ , respectiv de la o valoare inițială  $\rho_{di}$  a densității în stare uscată a terenului, și este efectuat cu un echipament de compactare prin rulare caracterizat prin diametrul ruloului  $D_r$ .

Astfel, tasarea maximă care poate fi realizată în procesul de compactare a unui teren definit prin densitatea sa maximă în stare uscată se determină prin una dintre relațiile:

$$\Delta h_{max} = 4,44 \cdot D_r (1 - D_{ci})^2, [\text{cm}] \quad (4.16)$$

sau

$$\Delta h_{max} = 4,44 \cdot D_r (1 - \rho_{di}/\rho_{dmax})^2, [\text{cm}] \quad (4.17)$$

Se observă că densitatea în stare uscată corespunzătoare unei tasări  $\Delta h$  realizate mai depinde și de următoarele:

- natura particulară a terenului;
- starea inițială de îndesare a terenului;
- forma și dimensiunile organului de lucru activ al compactorului.

În diagrama din figura 4.2 este reprezentată, pe baza relației (4.15), curba de variație  $\rho_d - \Delta h$  corespunzătoare unui pământ slab coeziv care este caracterizat prin densitatea sa maximă în stare uscată,  $\rho_{di} = 1,4 \text{ g/cm}^3$  și este compactat cu un echipament tehnologic caracterizat prin diametrul exterior al ruloului său vibrator  $D_r = 120 \text{ cm}$ .

Din diagramă se observă că valoarea maximă a densității pământului considerat se atinge pentru valoarea-limită maximă a tasării,  $\Delta h = 7,616 \text{ cm}$ , valoare care limitează și domeniul de existență al funcției  $\rho_d = f(\Delta h)$  în acest caz particular.

Datele corespunzătoare acestui exemplu de calcul vor fi utilizate și în continuare pentru particularizări și pentru verificarea imediată a corectitudinii modelului.

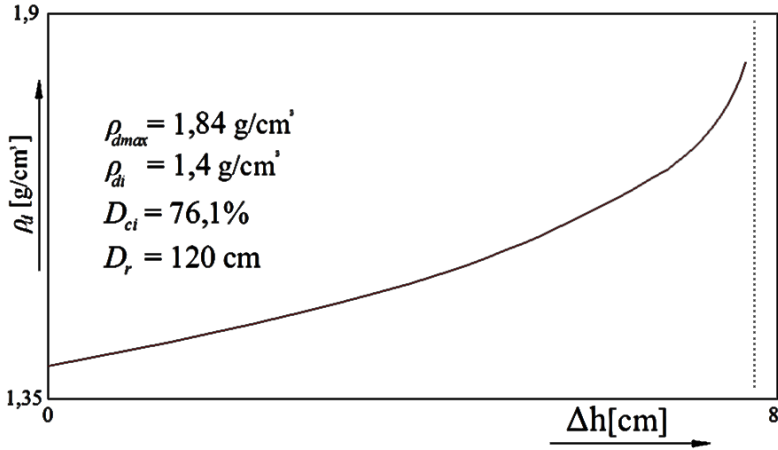
Prin tasare se obține o densitate maximă fie prin creștere (de la pământuri afânate), fie prin descreștere (de la blocuri compacte), ceea ce arată că starea compactată este o valoare-limită pentru o anumită structură.

Relația inversă dintre gradul de compactare a terenului  $D_c$  în funcție de tasarea realizată la un moment dat are următoarea formă:

$$D_c = 1 - \sqrt{(1 - D_{ci})^2 - 0,9 \cdot \frac{\Delta h}{D_r}}, \quad (4.18)$$

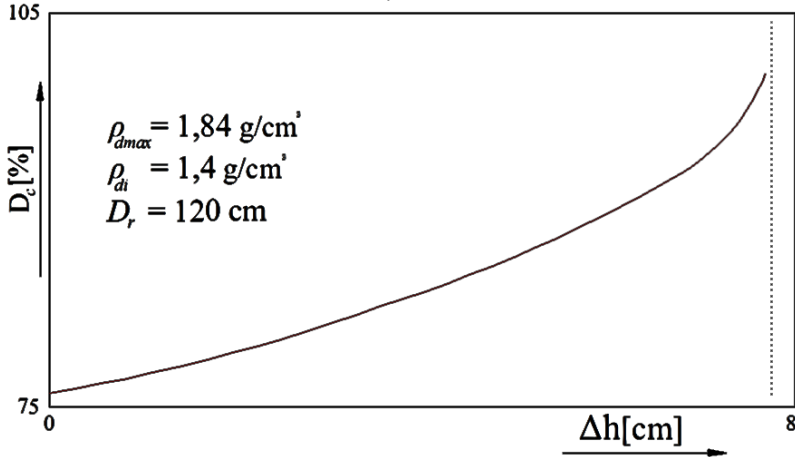
sau:

$$D_c = 100 \cdot \left[ 1 - \sqrt{(1 - D_{ci})^2 - 0,9 \cdot \frac{\Delta h}{D_r}} \right] [\%], \quad (4.19)$$



**Fig. 4.2. Dependența densității în stare uscată în funcție de tasarea pământului**

Pentru exprimare adimensională și, respectiv, în procente.



**Fig.4.3. Dependența gradului de compactare în funcție de tasare pentru un pământ slab coeziv**

Caracteristicile de limitare a domeniului de definiție observate la celelalte curbe ale modelului se regăsesc și în cazul curbei de variație a gradului de compactare definită prin funcția  $D_c = f(\Delta h)$ .

#### 4.5. Modulul static de deformație liniară în funcție de tasarea terenului

Dependența modului static de deformație liniară  $E_{st}$  în funcție de densitatea în stare uscată este caracteristică fiecărui tip de pământ: necoeziv (în special nisip), slab coeziv și balast [46].

Practic, începând din acest punct, modelul de interacțiune trebuie dezvoltat independent pentru fiecare tip de pământ în parte, rezultând de fapt trei modele de interacțiune, fiecare specific unui anumit tip de teren.

Pentru a facilita urmărirea modului de dezvoltare a modelului de interacțiune se va trata până la detaliu numai un singur tip de pământ – *pământul slab coeziv* – pentru celelalte tipuri de pământ urmând a se indica numai relațiile specifice lor și a se marca momentele din dezvoltarea modelului în care este necesară particularizarea tipului de pământ.

Relația de dependență a modului static de deformație liniară  $E_{st}$  a pământului corespunzător în funcție de tasarea  $\Delta h$  la un moment dat a acestuia are expresia următoare [46]:

- pentru pământuri slab coezive (model tratat complet):

$$\begin{aligned}
 E_{st} &= 711,221 \\
 &\cdot \left\{ \frac{1 - 1,3154}{\sqrt{1,8386 - \rho_{dmax} - \sqrt{(\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 - 0,9 \frac{\rho_{dmax}}{D_r} \Delta h}}} \right\}, \\
 &[\text{daN/cm}^2].
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

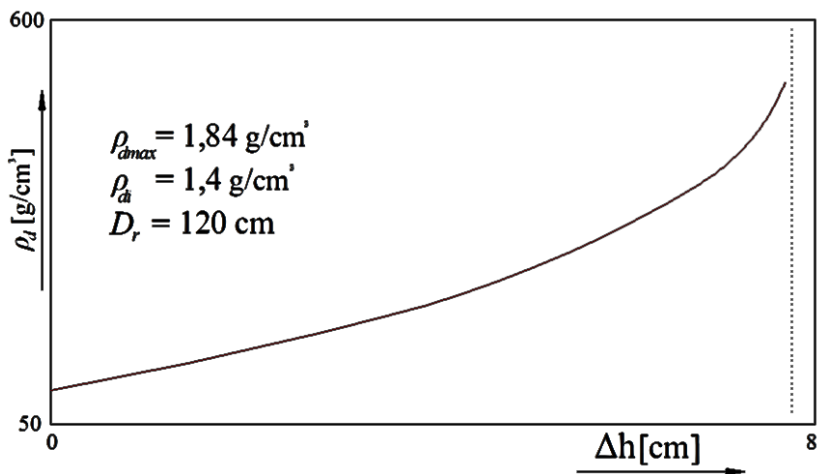
- pentru pământuri necoezive (nisip):

$$E_{st} = \left[ \rho_{dmax} - \sqrt{(\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 - 0,9 \cdot \frac{\rho_{dmax}^2}{D_r} \cdot \Delta h} \right] - 1175, [daN/cm^2]. \quad (4.21)$$

- pentru balast:

$$E_{st} = 206,289 \cdot \left[ (\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 + \rho_{dmax}^2 - 2 \cdot \rho_{dmax} \sqrt{(\rho_{dmax} - \rho_{di})^2 - 0,9 \cdot \frac{\rho_{dmax}^2}{D_r} \cdot \Delta h} - 0,9 \cdot \frac{\rho_{dmax}^2}{D_r} \cdot \Delta h \right] - 312,41, [daN/cm^2] \quad (4.22)$$

În diagrama din figura 4.4 este trasată curba de variație a modulului static de deformare liniară, conform relației (4.18) pentru pământuri slab coezive, particularizată pentru un pământ caracterizat prin valoarea densității maxime în stare uscată  $\rho_{dmax} = 1,84 \text{ g/cm}^3$ , compactat cu un compactor vibrator cu diametrul ruloului  $D_r = 120 \text{ cm}$ , de la starea inițială corespunzătoare valorii  $\rho_{di} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ . Din diagramă se observă că limita superioară a domeniului de existență al funcției  $E_{st} = f(\Delta h)$  este aceeași ca și în cazul densității în stare uscată – valoarea-limită a pământului pentru cazul particular considerat, respectiv,  $\Delta h = 7,616 \text{ cm}$  [46].



*Fig. 4.4. Dependența modului static de deformație în funcție de tasare pentru un model de pământ slab coeziv [46]*

#### 4.6. Coeficientul de rigiditate în funcție de tasarea terenului

În baza observațiilor experimentale s-a constatat că pământurile pot fi considerate un mediu cu un comportament elastic în cazul tasărilor de valori mici. Pornind de la această constatare experimentală, corelată și cu faptul că evoluția gradului de compactare a terenului este lentă și continuă, se poate considera că acesta cuprinde o succesiune de procese de compactare distincte, în care pământul evoluează de la o densitate inițială la una finală, având un comportament elastic pe parcursul fiecărui proces de compactare individual din cascadă.

Din punct de vedere al coeficientului de rigiditate al terenului, practic se poate considera că fiecare proces individual de compactare din cascadă se desfășoară asupra unui alt teren, caracterizat printr-un coeficient de rigiditate  $k$  diferit ca valoare, dar constant pe durata procesului tehnologic de compactare.

Deformația elastică a pământului la încheierea fiecărui proces individual din cascadă se consideră „înghețată” la valoarea

instantanee atinsă și se asimilează cu o deformare plastică remanentă, respectiv cu o tasare. Astfel, comportarea neliniară a pământului observată experimental pentru procesul de compactare de ansamblu prin apariția deformațiilor permanente este modelată printr-o secvență de procese de deformare elastică „înghețate” înainte de faza de revenire elastică, urmată de cumularea deformațiilor elastice „înghețate” prin care se constituie în final tasarea pământului în procesul de compactare luat în ansamblu, necorectată, în această fază, printr-o considerare a fenomenului de revenire elastică.

Stabilirea relației de legătură dintre coeficientul de rigiditate  $k$  a pământului și tasarea acestuia realizată la un moment dat în timpul procesului de compactare pornește de la definiția coeficientului elastic de deformare  $C_z$ , care este determinat experimental în cazul utilizării metodei încărcărilor ciclice cu placa de probă pentru stabilirea valorii modulului transversal  $G$  al pământului.

Coeficientul elastic de deformare,  $C_z$ , definit prin relația:

$$C_z = p/S_e [daN/cm^3] \quad (4.23)$$

este legat de coeficientul de rigiditate  $k$  al pământului prin relația:

$$k = C_z \cdot A [daN/cm], \quad (4.24)$$

în care  $p$  - presiunea aplicată, în  $[daN/cm^2]$ ;  
 $S_e$  - tasarea elastică din descărcare, în  $[cm]$ ;  
 $A$  - aria suprafeței de contact, în  $[cm^2]$ .

De asemenea,  $C_z$  este legat de modulul transversal de deformare  $G$  prin relația:

$$C_z = \frac{2,26 \cdot G}{(1-\nu) \cdot \sqrt{A}} [daN/cm^3] \quad (4.25)$$

unde  $\nu$  este coeficientul lui Poisson.

Având în vedere că modulul de deformare transversal  $G$  este dependent de modulul de deformare axial  $E_{st}$  prin relația:

$$G = \frac{E_{st}}{2 \cdot (1+\nu)} [daN/cm^2] \quad (4.26)$$



și considerând și relația prin care se determină aria de contact dintre rulou și teren de forma:

$$A = B \cdot b^* [cm^2], \quad (4.27)$$

pentru coeficientul de rigiditate al terenului rezultă relația:

$$k = \frac{1,13 \cdot E \sqrt{B \cdot b^*}}{1 - \nu^2}, [daN/cm]. \quad (4.28)$$

În final, se obține expresia matematică a dependenței dintre coeficientul de rigiditate  $k$  și tasarea  $\Delta h$  a terenului sub forma [44, 46]:

$$k = \frac{1,13 \cdot E(\Delta h)}{1 - \nu^2} \cdot \sqrt{0,667 \cdot B \cdot \sqrt{D_r^2 \cdot (1 - D_{c_i})^2 - 0,9 \cdot D_r \cdot \Delta h}}, [daN/cm]. \quad (4.29)$$

În relația (4.29), prin  $E(\Delta h)$  s-a notat modulul static de deformare liniară  $E_{st}$  dependent de tasarea  $\Delta h$ .

Pentru pământuri slab coezive, funcția  $k = f(\Delta h)$ , notată în continuare  $k(\Delta h)$ , se obține prin utilizarea relațiilor (4.20) și (4.29).

În mod similar, pentru pământuri necoezive (nisip), se vor utiliza relațiile (4.21) și (4.29), iar pentru balast relațiile (4.22) și (4.29).

În diagrama din figura 4.5 este reprezentată dependența coeficientului de rigiditate a terenului în funcție de tasarea  $\Delta h$ , trasată pe baza relației (4.29) dezvoltată pentru pământuri slab coezive, în cazul pământului particular din categoria pământurilor slab coezive, definit anterior.

Diagrama pune în evidență comportarea neliniară a pământului în cadrul procesului de compactare considerat în ansamblu [46].

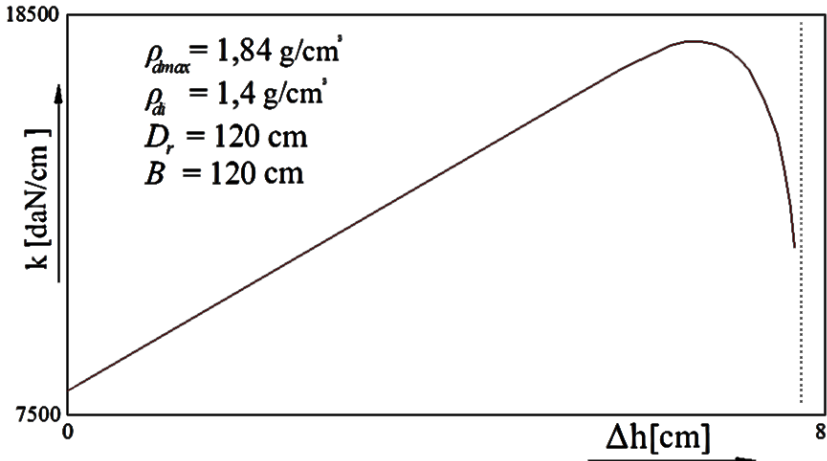


Fig. 4.5. Dependența coeficientului de rigiditate în funcție de tasare (pentru un pământ slab coeziv) [46]

#### 4.7. Forța de rezistență a terenului în funcție de tasarea acestuia

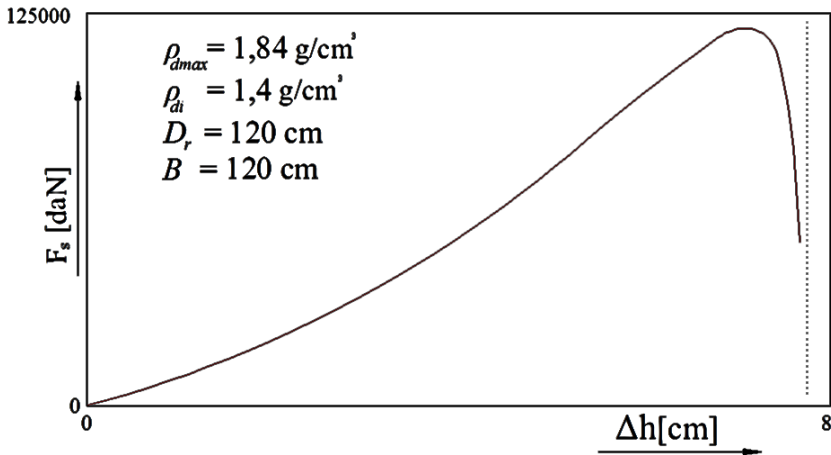


Fig. 4.6. Dependența forței elastice de rezistență la compactare în funcție de tasare (model de pământ slab coeziv)

Din această ipoteză a comportării elastice a terenului, în cazul tasărilor cu valori mici, la compactarea pământului, reiese faptul că forța de rezistență  $F_s$  opusă de teren în procesul de compactare este de tip elastic și, ca urmare, expresia dependenței sale de tasarea realizată la un moment dat este dată de relația [46]:

$$F_s = k(\Delta h)\Delta h[daN] \quad (4.30)$$

care se dezvoltă pentru cazul pământurilor coezive, utilizând apoi relațiile (4.20) și (4.29).

În mod similar, pentru pământurile necoezive (nisip) se vor utiliza relațiile (4.21), (4.30) și (4.29), iar pentru balast relațiile (4.22), (4.29) și (4.30).

În diagrama din figura 4.6 este dată variația forței elastice de rezistență la compactarea terenului, în funcție de tasarea  $\Delta h$ , trasată pe baza relației (4.30) dezvoltată pentru pământuri slab coezive, în cazul pământului particular din categoria pământurilor slab coezive.

Diagrama relevă, de asemenea, comportarea neliniară a pământului, în cadrul procesului de compactare în ansamblu [46].

Curba  $F_s - \Delta h$  din figura 4.6 poate fi interpretată ca reprezentând rezerva de capacitate portantă a terenului corespunzător tasării efectuate la un moment dat în procesul de compactare [46].

#### **4.8. Efortul unitar (tensiuni) axial de compactare în funcție de tasarea terenului**

Efortul unitar (tensiuni) axial  $\sigma_c$  evoluat în teren de acțiunea dinamică a utilajului de compactat însumă atât efectul direct al acțiunii utilajului asupra terenului, cât și reacțiunea terenului supus compactării asupra utilajului. Astfel, se poate afirma cu certitudine că acest parametru reflectă interacțiunea dintre compactor și teren în procesul tehnologic și că monitorizarea lui este un indiciu important în cunoașterea stadiului procesului de compactare [46].

Variația efortului unitar axial în funcție de tasarea  $\Delta h$  a terenului se exprimă prin relația:

$$\sigma_c = \frac{Q^*}{B \cdot D_r} \cdot \left[ \frac{1,5 \cdot \sqrt{D_r}}{\sqrt{(1 - D_{ci})^2 \cdot D_r - \frac{0,9}{D_r} \cdot \Delta h}} - \frac{1,125 \cdot 10^{-5} \cdot t_c \cdot V_r}{(1 - D_{ci})^2 \cdot D_r - 0,9 \cdot \Delta h} \right] [daN/cm^2] \quad (4.31)$$

$k_d$  - coeficientul de amplificare dinamică;

$v_r$  - viteza de deplasare a utilajului în timpul procesului de lucru, în [cm/s];

$t_c$  - timpul de consolidare integrală a pământului, în [s];

$D_{ci}$  - gradul de compactare inițial al terenului exprimat adimensional;

$Q$  - greutatea ruloului, în [daN];

$Q^*$  - încărcarea transmisă terenului de utilaj definită prin relația:

$$Q^* = k_d(Q + F_0)[daN] \quad (4.32)$$

unde  $F_0$  este forța perturbatoare [daN].

În diagrama din figura 4.7 este reprezentată variația efortului unitar axial de compactare, în funcție de tasarea  $\Delta h$ , trasată pe baza relației (4.31) pentru pământuri slab coezive, în cazul pământului particular definit prin parametrii:  $\rho_{dmax} = 1,84 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{di} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ ;  $t_c = 2h$ ;  $D_{ci} = 0,761$ , în condițiile compactării efectuate cu un utilaj definit prin parametrii:  $F_0 = 4000 \text{ daN}$ ;  $Q = 2000 - 10000 \text{ daN}$ ;  $f = 10 \dots 50 \text{ Hz}$ ;  $v_r = 28 \text{ cm/s}$ ;  $D_r = 120 \text{ cm}$ ;  $B = 160 \text{ cm}$ .

Familia de curbe trasată are ca parametru încărcarea echivalentă  $Q^*$  transmisă de compactor terenului. Diagrama relevă comportarea neliniară a pământului în cadrul procesului de compactare în ansamblu și influența variației sarcinii transmise terenului asupra efectului de compactare realizat de utilaj, inclusiv tipului de sarcină de compactare aplicată (statică sau dinamică).

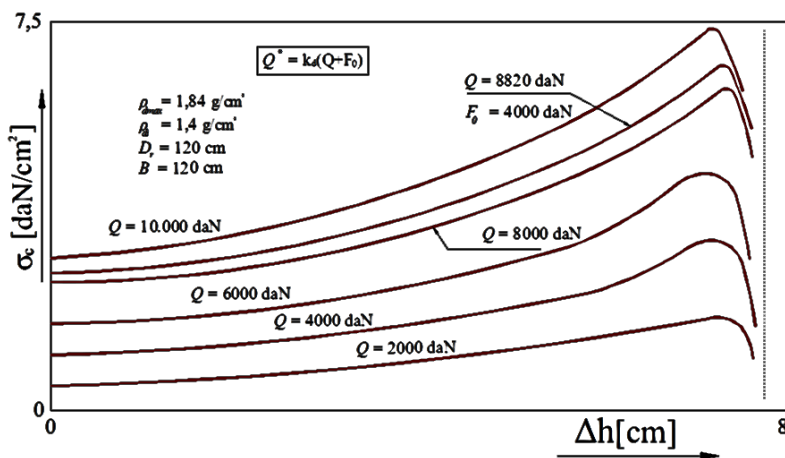


Fig. 4.7. Dependența efortului unitar axial de compactare cu tasarea pentru un model de pământ slab coeziv [46]

#### 4.9. Parametrii esențiali implicați în procesul de interacțiune vibrator-teren

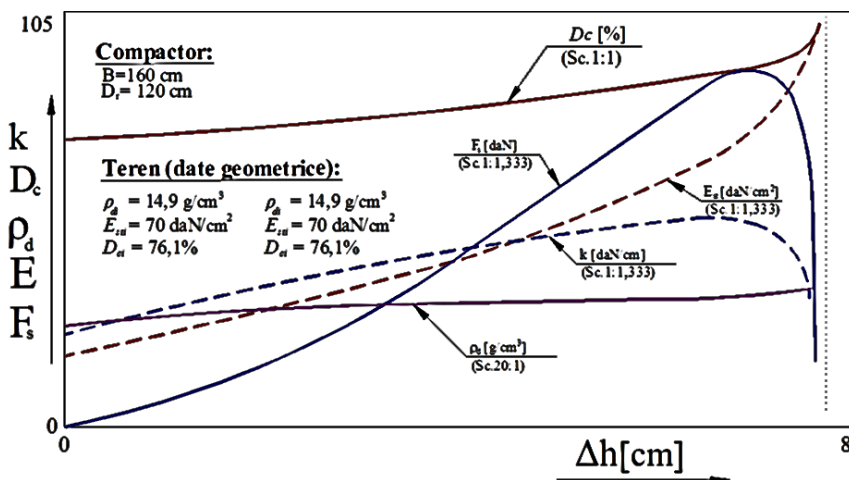
Parametrii analizați, respectiv densitatea în stare uscată a pământului  $\rho_d$ , modulul static de deformare a pământului  $E_{st}$ , gradul de compactare  $D_c$ , coeficientul său de rigiditate  $k$  și forța elastică de rezistență la compactare a solului  $F_s$ , exprimați toți prin dependența lor de tasarea  $\Delta h$ , realizată la un moment dat în procesul de compactare, alcătuiesc un set de parametri prin intermediul cărora se poate urmări în timpul desfășurării procesului tehnologic comportamentul unui pământ caracterizat prin densitatea sa maximă în stare uscată,  $\rho_{dmax}$ , având gradul inițial de compactare  $\rho_{di}$  [46].

Diagrama din figura 4.8 reprezintă acești parametri dați simultan la scări diferite, corelate pentru a efectua încadrarea tuturor funcțiilor în limitele domeniului de valori 0...100, către domeniul de variație al tasărilor cuprins între 0 și 8 cm, potrivit valorilor rotunjite ale tasării maxime posibile din exemplul propus spre studiere [46].

Acest mod de reprezentare permite atât urmărirea variației individuale a fiecărui parametru în parte, cât și urmărirea corelației

directe dintre acești parametri prin intermediul parametrului de referință comun  $\Delta h$ , din punct de vedere al efectelor pe care le produce în teren acțiunea mașinii de compactare la realizarea unei tasări cu o valoare din domeniul său de existență.

Astfel, se poate urmări evoluția performanței și eficienței tehnologice a procesului de compactare a terenului reflectate prin evoluția gradului de compactare, a densității în stare uscată și a modului static de deformație liniară a pământului [46].



**Fig. 4.8. Dependența globală a parametrilor esențiali implicați în procesul de interacțiune compactor–teren în funcție de tasare pentru un model de pământ slab coeziv [46]**

Generalitatea modului în care se comportă terenul în timpul procesului de compactare este limitată la nivelul tipului de pământ pentru care a fost dezvoltat, respectiv, pământ slab coeziv.

Astfel, în diagrama din figura 4.8 sunt trasate curbele de variație a parametrilor care reprezintă comportamentul terenului, pentru cazul particular al unui pământ caracterizat prin valoarea  $\rho_{dmax} = 1,84 \text{ g/cm}^3$  [46], compactarea pornind de la starea inițială

corespunzătoare valorii  $\rho_{di} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ , fiind efectuată cu un utilaj de compactare, având diametrul ruloului  $D_r = 120 \text{ cm}$ .

Efectul de compactare este urmărit strict prin evoluția valorică a tasării realizate, fără precizări asupra modului în care se realizează aceasta.

Din diagramă observăm că domeniul de existență al tuturor funcțiilor ce descriu variația parametrilor reprezentați este limitat superior de valoarea tasării maxime a pământului pentru cazul dat particular, respectiv  $\Delta h = 7,616 \text{ cm}$  [46].

Acțiunea echipamentului tehnologic este controlată prin valoarea parametrului de *tasare efectuată a terenului*  $\Delta h$ , deci, parametrul comun de referință al tuturor curbelor de variație caracteristic, ce introduce în mod explicit numai influențele care caracterizează contactul local rulou compactor–teren asupra sa, bazat pe valorile particulare ale parametrilor constructivi ai organului activ de lucru (lungimea  $B$  a ruloului vibrator și diametrul  $D_r$ ) [46].

## ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND VALIDAREA TEHNOLOGIEI DE COMPACTARE DINAMICĂ

### 5.1. Generalități

Pentru utilizarea pământurilor la realizarea structurilor rutiere sunt necesare materiale de adaos, cât și tehnologii adecvate care să ducă la asigurarea parametrilor de rezistență și stabilitate la nivelul cerințelor normative.

În acest context, prezenta lucrare evidențiază efectul enzimelor în amestec cu pământul natural, agregatele minerale și materialele de adaos. Pentru anumite categorii de pământuri cu conținut semnificativ de argilă în amestec cu nisip și agregate minerale cu un tratament adecvat de stabilizatori enzimatici au fost obținute rezultate experimentale remarcabile. Astfel, caracteristicile structurilor stabilizate cu enzime pot fi definite pe baza rezistenței mecanice  $\sigma_z$  a modulului de elasticitate longitudinal  $E_z$  pe direcție verticală, a modulului de elasticitate volumică  $E_v$  și a coeficientului de rigiditate  $k$  pe direcție verticală.

Prezența enzimelor în amestecul de material se face remarcată, în condiții de dozare, malaxare și omogenizare corespunzătoare, prin modificarea coeficientului lui Poisson, notat cu  $\nu$ .

În acest caz, prin valori crescătoare ale lui  $\nu$  către limita maximă  $\nu_{\max} = 0,5$  se constată creșterea modulului de elasticitate volumică, creșterea rezistenței, cât și creșterea rigidității structurii realizate.

### 5.2. Cercetări experimentale parametrice privind pământurile stabilizate cu enzime

#### 5.2.1. Rigiditatea structurii de pământ stabilizat procesat

În procesul de malaxare a amestecului pământ–agregate minerale trebuie asigurată doza optimă de alimentare în stare



atomizată cu enzime sau polienzime care să ocupe spațiile poroase prin diminuarea conținutului de apă din rețeaua poroasă naturală.

Tehnologiile actuale cu control automat și monitorizare informatică sunt capabile să asigure o mare varietate de soluții tehnice [13].

Din aceste motive, materialul procesat sub formă de pământ stabilizat cu enzime trebuie să aibă rețeaua poroasă cu un conținut semnificativ de enzime pentru mărirea coeficientului Poisson și creșterea rezistenței la procesul de gelivitate (îngheț-dezgeț).

În domeniul deformațiilor elastice pentru structura rutieră pusă în operă, pe direcție verticală, ca urmare a compactării prin vibrație, rigiditatea poate fi estimată astfel:

$$k = C_z S \quad (5.1)$$

în care  $k$  este coeficientul de rigiditate în domeniul elastic;

$C_z$  - coeficientul de contracție elastică uniformă corespunzător ariei  $S$  a suprafeței dreptunghiulare de contact [47, 51].

Pentru coeficientul de contracție elastic uniformă se aplică relația:

$$C_z = \alpha \frac{E_z}{\sqrt{S}} \frac{1}{1-\nu^2} \quad (5.2)$$

unde  $\alpha$  este coeficientul de formă al suprafeței reale ce se materializează printr-o placă de contact cu valori cuprinse în domeniul  $0,8 \div 1,5$ ;

$E_z$  - modulul de elasticitate longitudinală (monoaxială) a pământului;

$\nu$  - coeficientul lui Poisson.

În cazul încercărilor *in situ* pentru o anumită categorie de pământ se poate utiliza „placa de probă” cu o suprafață dreptunghiulară de arie  $S'$  care permite calculul coeficientului de rigiditate  $k'$  pentru „terenul de probă” prin relația:

$$k' = \alpha \frac{E_z \sqrt{S'}}{1-\nu^2} \quad (5.3)$$

Coeficientul de rigiditate  $k$  pentru suprafața reală  $S$  de formă dreptunghiulară (pata de contact) dintre ruloul vibrator și teren (stratul de pământ stabilizat) poate fi calculat prin relația:

$$k = \frac{\alpha E_Z \sqrt{S}}{1 - \nu^2} \quad (5.4)$$

Din relațiile (5.3) și (5.4) poate fi estimată valoarea lui  $k$  în raport cu valoarea lui  $k'$  determinate experimental astfel:

$$k = k' \sqrt{\frac{S}{S'}} \quad (5.5)$$

Pentru placa de probă cu  $S = 4500 \text{ cm}^2$  a fost determinat experimental în regim dinamic de vibrații de rezonanță coeficientul de rigiditate  $k'$  pentru diverse categorii de teren (tabelul 5.1) [56].

**Tabelul 5.1. Valori experimentale ale rigidității  $k'$  cu placa dinamică de probă**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Natura stratului de pământ stabilizat</i>	<i>Coeficientul de rigiditate <math>k'</math>, MN/m</i>
1	Pământ nisipos afânat Pietriș (3 ÷ 7) mm cu nisip	44,0
2	Nisip fin argilos afânat Pietriș (7 ÷ 15) mm cu nisip argilos	67,5
3	Nisip cu granulație medie și ușor argilos, afânat	90,0
4	Nisip cu granulație medie până la mare	95,6
5	Pietriș (7 ÷ 15) mm cu pământ precompactat Argilă cu pietriș compactată	120,0

### 5.2.2. Modulul de elasticitate longitudinală

Pentru o probă cilindrică extrasă din stratul de pământ stabilizat/compactat, supusă la comprimarea monoaxială, potrivit cerințelor standardelor, modulul elastic axial  $E_z$  se determină astfel:

$$E_z = \frac{4}{\pi} \frac{F_z}{d^2 - d_0^2} \frac{h_0}{\Delta h} \quad (5.6)$$

unde:  $F_z$  este forța axială aplicată centric;

$d_0$  - diametrul inițial al probei necomprimate;

$h_0$  - înălțimea inițială a probei necomprimate;

$d$  - diametrul final al secțiunii transversale mediane după comprimare;

$h$  - înălțimea finală rămasă a probei după comprimare;

$\Delta h$  - variația înălțimii (tasarea) probei sub forța de compresiune astfel încât  $\Delta h = h - h_0 < 0$ .

Astfel, pe baza a 1500 de probe prelevate din stratul de pământ stabilizat cu enzime și compactat cu un rulou vibrator, s-au determinat valorile modulului  $E_z$ .

În funcție de cantitatea masică de enzime, raportată la 100 kg de pământ frezat, amestecat, compactat, adică la doza procentuală  $\varepsilon$ , %, s-au obținut valorile modulului de elasticitate longitudinală  $E_z$  date în tabelul 5.2.

**Tabelul 5.2. Modulul  $E_z$  în funcție de  $\varepsilon$**

$\varepsilon, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$E_z, \text{MN/m}^2$	5,81	6,50	7,80	8,78	9,15	10,21

### 5.2.3. Coeficientul lui Poisson

În cazul compresiunii monoaxiale pe direcția Z cu forța  $F_z$  procesul de deformare axială caracterizat prin deformația specifică  $\varepsilon_z = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}$  este însoțit în mod legic de deformația transversală

din planul median, exprimată prin  $\varepsilon_y = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$ , astfel încât  $\varepsilon_y = \nu \varepsilon_z$  [13, 33, 57].

Ca urmare, coeficientul lui Poisson  $\nu$  poate fi determinat prin relația:

$$\nu = \frac{h_0}{d_0} \frac{\Delta d}{|\Delta h|} \quad (5.7)$$

Rezultatele experimentale au evidențiat valori ale lui  $\nu$  cuprinse între 0,42 și 0,485 pentru cele 1500 de probe prelevate *in situ*.

În tabelul 5.3 se prezintă valorile coeficientului lui Poisson în funcție de doza procentuală  $\varepsilon$  a stabilizatorului enzimatic [47, 51].

**Tabelul 5.3. Valorile coeficientului lui Poisson în funcție de  $\varepsilon$ , %**

$\varepsilon, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\nu$	0,421	0,442	0,453	0,465	0,475	0,485

#### 5.2.4. Modulul de elasticitate volumică

Pentru terenuri cu suprafețe mari și spații largi supuse vibrațiilor sau proceselor ondulatorii cu propagare unidirecțională, modulul volumic  $E_v$  poate fi determinat astfel:

$$E_v = E_z \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5.8)$$

Se constată că prin modificarea porozității și alimentarea golurilor cu substanțe fluidice stabile, coeficientul lui Poisson crește până la valoarea-limită ( $\nu_{\max} = 0,5$ , astfel încât  $\nu < \nu_{\max}$ ).

• Modulul de elasticitate volumică  $E_v$  în funcție de modulul  $E_z$  și  $\nu$ , determinat pe cale experimentală, este dat în tabelul 5.4.

**Tabelul 5.4. Modulul  $E_v$  în funcție de modulul  $E_z$  și  $\nu$**

$\nu$	0,421	0,442	0,453	0,465	0,475	0,485
$E_z$ , MN/m <sup>2</sup>	5,81	6,50	7,80	8,78	9,46	10,21
$E_v$ , MN/m <sup>2</sup>	14,96	21,83	31,25	45,86	67,26	117,80

Probele realizate pe straturi de pământ stabilizat cu enzime în doza  $\varepsilon = 0,5\%$  au fost utilizate pentru urmărirea în timp. Modulul elastic volumic (deformare) dinamic măsurat *in situ* la 35 m de sursa de compactare prin vibrare, la anumite intervale de timp este dat în tabelul 5.5.

**Tabelul 5.5. Modulul de elasticitate volumic  $E_v$  în timp [54, 55]**

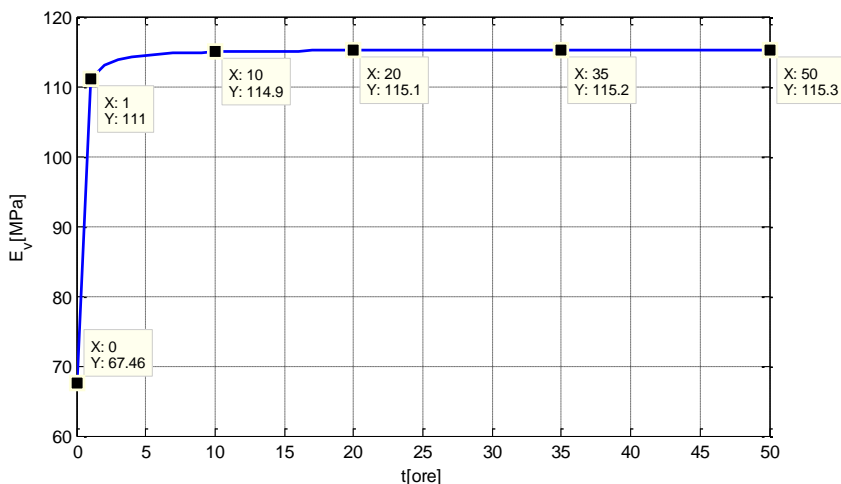
Timpul, ore	0	16	24	48	72
$E_v$ , MN/m <sup>2</sup>	67,5	70,5	96,3	101,8	109

Evoluția reologică în raport cu timpul evidențiază o creștere asimptotică stabilă, așa cum rezultă din datele experimentale cuprinse în tabelul 5.2. Astfel, legea reologică stabilită de este de forma [50]:

$$E_v(t) = \frac{0,877 + 15t}{0,13t + 0,013}$$

cu  $E_v(0) = 67,46 \text{ MN/m}^2$  la momentul  $t = 0$ .

Variabila temporală  $t$  se exprimă în ore.



**Fig. 5.1. Variația modului de elasticitate volumică în raport cu timpul**

Conform rezultatelor obținute pe cale experimentală, în figura 5.1 se reprezintă curba de variație a modului  $E_v(t)$  în raport cu timpul.

### 5.2.5. Indicele Californian CBR

Indicele Californian de capacitate portantă se exprimă sub forma  $CBR = \frac{F_p}{F_s}$  pentru adâncimea de penetrare  $\Delta p$ , unde  $F_p$  este forța de penetrare efectivă, iar  $F_s$  este forța standard corespunzătoare valorilor  $\Delta p = 2,5$  mm și  $\Delta p = 5$  mm. Pentru pământuri stabilizate cu enzime s-au obținut valorile din tabelul 5.6 [52, 53].

**Tabelul 5.6. Indicele CBR, % pentru pământul stabilizat**

<i>Lot de probă</i>	<i>Valoarea medie a forței de penetrare efectivă</i>	<i>CBR<sub>2,5</sub>, Δp = 2,5 mm F<sub>s</sub> = 13,2 KN</i>	<i>CBR<sub>5</sub>, Δp = 5 mm F<sub>s</sub> = 20,0 KN</i>
I	8,3	63	-
	11,0	-	53
II	7,5	56	-
	9,2	-	46
III	7,8	58	-
	9,3	-	46
IV	9,45	71,5	-
	13,11	-	66
V	Indicele CBR, % pentru pământ netratat		
	3,11	23,55	-
	3,86	-	19,32

### 5.3. Determinarea rezistenței la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat

Epruvetele de pământ stabilizat netratate termic, prelevate din straturile recoltate din amplasament, au fost menținute în condiții

normale de laborator la temperatura de +200°C până la 7 zile, fiind ulterior supuse încercării la compresiune monoaxială.

Epruvetele de pământ stabilizat tratate termic s-au prelevat din probe compactate la umiditatea optimă, fiind păstrate 48-72 ore în condiții normale de laborator la temperatura de +200°C înainte de a fi expuse la ciclurile de îngheț-dezghet. Durata minimă a ciclurilor de îngheț și dezghet la care au fost supuse probele analizate a fost stabilită la 24 ore, respectiv durata maximă de 96 ore la temperatura de -100°C în frigider de laborator Liebhart.

După fiecare perioadă de îngheț și dezghet s-au efectuat măsurători privind variația parametrilor specifici probelor (volum, masa, densitate) cu scopul estimării modului în care ciclurile alternative de îngheț-dezghet influențează asupra comportamentului pământului stabilizat, în special a parametrilor de rezistență.

Înregistrările măsurătorilor corespunzătoare pentru masă și densitatea probelor supuse la 3 cicluri îngheț-dezghet sunt incluse în tabelele 5.7, 5.8, nefiind observate modificări ale înălțimii probelor [47, 48, 49, 130].

**Tabelul 5.7. Valorile masei probelor supuse la 3 cicluri de îngheț-dezghet**

<i>Determinare</i>	<i>Masa probei (g)</i>		
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>
Inițial	1830,46	1618,35	1757,11
Îngheț	1811,57	1597,18	1740,26
Dezghet	1797,39	1584,02	1726,87
Îngheț	1801,58	1587,84	1730,34
Dezghet	1782,21	1568,96	1713,01
Îngheț	1786,36	1597,88	1746,68
Dezghet	1761,23	1586,95	1735,12

Metoda utilizată a constat în aplicarea în mod continuu, asupra epruvetei de pământ, a unei încărcări axiale, uniform crescătoare, pentru a stabili rezistența la compresiune monoaxială și deformația axială specifică corespunzătoare atingerii rezistenței la compresiune monoaxială. Viteza de deformare impusă a fost de 0,02 mm/min. [130].

**Tabelul 5.8. Valorile masei probelor supuse la 3 cicluri de îngheț–dezgheț**

<i>Determinare</i>	<i>Masa probei (g)</i>		
	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
Inițial	1661,96	1717,03	1778,22
Îngheț	1645,03	1689,15	1756,43
Dezgheț	1630,09	1684,58	1756,66
Îngheț	1636,89	1682,03	1752,15
Dezgheț	1628,2	1675,12	1740,07
Îngheț	1649,79	1686,93	1749,33
Dezgheț	1638,23	1672,85	1738,54

La încercarea pământurilor la compresiune monoaxială este menționat faptul că determinarea rezistenței la compresiune monoaxială se efectuează pe epruvete cilindrice cu păstrarea raportului egal cu aproximativ 2 între înălțime (h) și diametru (d). Luând în considerare că epruvetele cilindrice prelevate nu au avut dimensiunile prevăzute, s-au aplicat factori de corecție standard ai rezistenței, conform prevederilor din BS 1881, Part 120 (tabelul 5.9) [130].



**Tabelul 5.9. Factori de corecție a rezistenței (BS 1881, Part 120)**

<i>Raport înălțime/diametru (h/d)</i>	<i>Factori de corecție a rezistenței</i>
2.00	1.00
1.75	0.97
1.50	0.92
1.25	0.87
1.00	0.80

Valorile rezistenței specifice la compresiune monoaxială obținute pentru probele de pământ netratate termic (tabelul 5.10) și supuse ciclurilor de îngheț-dezghet (tabelul 5.11) au fost corectate cu factorii corespunzători raportului h/d [130].

**Tabelul 5.10. Rezistențe specifice la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat netratat termic**

<i>Cod probă</i>	<i>Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie necorectată</i>		<i>Raport h/d</i>	<i>Factor de corecție (BS 1881, Part 120)</i>	<i>Rezistența specifică la compresiune monoaxială corectată</i>	
	<i>(<math>\sigma</math>, N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>(<math>\sigma</math>, kPa)</i>			<i>(<math>\sigma</math>, N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>(<math>\sigma</math>, kPa)</i>
<b>Pământ stabilizat netratat termic</b>						
P1	0,330	330	1,36	0,89	0,294	294
P2	0,277	277	1,41	0,90	0,247	247
P3	0,407	407	1,34	0,89	0,360	360
P4	0,412	412	1,20	0,86	0,346	346
PN	0,176	176	0,97	1,76	0,170	170

Luând în considerare valorile caracteristicilor de rezistență obținute pentru probele martor și pentru probele supuse la cicluri de îngheț-dezghet, se remarcă o creștere a rezistenței la compresiune prin îngheț-dezghet (cu excepția probelor de pământ natural, unde se observă o scădere a rezistenței) calculată prin relația [130]:

$$\Delta R = \frac{R_{FT} - R_m}{R_{FT}} \cdot 100$$

unde:  $R_m$  - rezistența la compresiune a epruvetelor de pământ stabilizat netratat termic;

$\Delta R_{FT}$  - rezistența la compresiune a epruvetelor de pământ stabilizat supuse la îngheț-dezghet.

**Tabelul 5.11. Rezistențe specifice la compresiune monoaxială pe probe de pământ stabilizat supus ciclurilor de îngheț-dezghet**

Cod probă	Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie necorectată		Raport h/d	Factor de corecție (BS 1881, Part 120)	Rezistența specifică la compresiune monoaxială medie corectată	
	( $\sigma$ , N/mm <sup>2</sup> )	( $\sigma$ , kPa)			( $\sigma$ , N/mm <sup>2</sup> )	( $\sigma$ , kPa)
Pământ stabilizat supus ciclurilor de îngheț-dezghet						
P1-FT	0,617	617	0,87	1,26	0,531	531
P2-FT	0,555	555	0,90	1,40	0,488	488
P3-FT	0,785	785	0,88	1,30	0,688	688
P4-FT	1,530	1530	0,88	1,30	1,327	1327
PN-FT	0,149	149	0,87	1,25	0,129	129

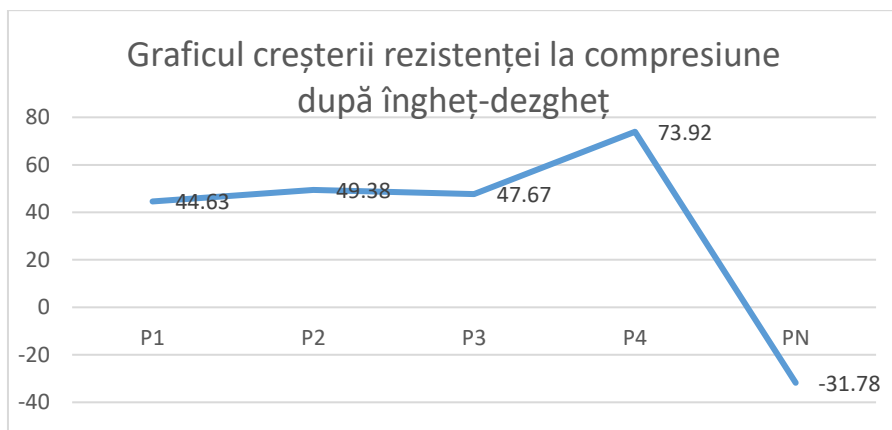
În continuare sunt prezentate unele probe examinate în figura 5.2.



**Fig. 5.2. Reprezentarea probelor examinate [48, 49, 50]**

Prin raportarea la epruvetele de pământ stabilizat expuse ciclurilor de îngheț–dezgheț se observă o tendință pronunțată de creștere semnificativă și uniformă de 43-55% a caracteristicilor de rezistență pentru probele recoltate din lotul 1 și lotul 2, respectiv de 72-75% pentru cele corespunzătoare lotului A/B.

Excepție face proba de pământ naturală, care manifestă o sensibilitate la îngheț–dezgheț prin scăderea rezistenței cu 32%. Se poate concluziona că pământurile stabilizate cu produse enzimatice supuse ciclurilor succesive de îngheț–dezgheț au stabilitate ridicată [130].



**Fig. 5.3. Reprezentarea grafică a creșterii rezistenței la compresiune după îngheț-dezghet**

„Determinarea permeabilității în laborator”, SR 1913/6-76  
 „Teren de fundare”

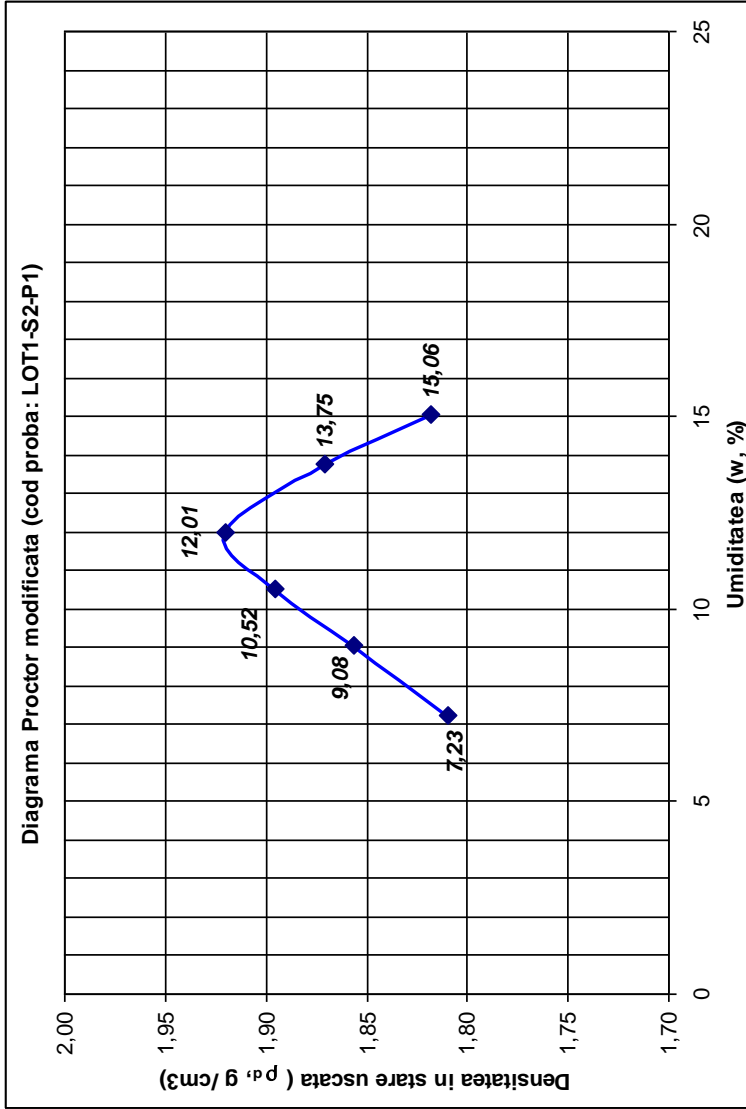
**Tabelul 5.12. Determinarea permeabilității în laborator**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Cod probă</i>	<i>Gradient hidraulic (i)</i>	<i>Coeфициent de permeabilitate <math>k_t</math> (cm/s)</i>
1	LOT1-S2	16,52	8,11E-09
		14,78	7,69E-09
		11,30	7,07E-09
		7,62E-09	

Identificarea metodei utilizate: PTE-GFC-07 „Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor” (încercarea Proctor modificată), SR EN 13286-2:2011. - Amestecuri agregate - Compactare Proctor.

**Tabelul 5.13. Caracteristicile unei probe analizate**

<i>Caracteristici</i>	<i>Unități de măsură</i>	<i>Numărul încercării</i>					
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Masa cilindului și materialului, m <sub>1</sub>	g	7800,4	7978,5	8128,2	8245,6	8197,2	8120,8
Masa cilindului gol, m <sub>2</sub>	g	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9	3681,9
Masă material, m <sub>m</sub>	g	4118,46	4296,6	4446,3	4563,7	4515,3	4438,9
Volumul materialului compactat, V	cm <sup>3</sup>	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03	2122,03
Densitatea $\rho = \frac{m_m}{V}$	g/cm <sup>3</sup>	1,94	2,02	2,10	2,15	2,13	2,09
Umiditatea medie, w	%	7,23	9,08	10,52	<b>12,01</b>	13,75	15,06
Densitatea în stare uscată $\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100} \cdot \rho_s}$	g/cm <sup>3</sup>	1,81	1,86	1,90	<b>1,92</b>	1,87	1,82



**Fig. 5.4. Încercarea unei probe cu Proctor modificat**

## 5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale

Experimentările efectuate atât *in situ*, cât și în laborator au avut drept scop evidențierea modificării parametrilor de deformabilitate, elasticitate și rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime pe baza unui procedeu permanent, comparativ cu aceleași pământuri netratate cu stabilizatori enzimatici, adică în stare naturală:

- Modulul de elasticitate longitudinală  $E_z$  determinat la solicitarea de comprimare axială, conform relației 5.6, pentru pământuri stabilizate, a fost evaluat pentru 1500 de probe prelevate din stratul de teren stabilizat pentru șase doze masice  $\varepsilon$  de stabilizator, așa cum rezultă din tabelul 5.2. Se constată că pe măsură ce cantitatea procentuală de stabilizator  $\varepsilon$  crește, în aceeași măsură se mărește și modulul  $E_z$ .

- Coeficientul lui Poisson, determinat experimental pe baza relației 5.7, pentru pământuri stabilizate, în cantitățile procentuale  $\varepsilon$  ale stabilizatorului, se constată că este crescător potrivit tabelului 5.3.

- Modulul volumic  $E_v$  depinde atât de coeficientul lui Poisson, cât și de modulul  $E_z$ . Astfel, pe măsură ce modulul lui Poisson și dozajul de stabilizator cresc, se constată o mărire pronunțată a modulului volumic, potrivit datelor din tabelul 5.4.

- Indicele Californian CBR, cu rezultatele experimentale din tabelul 5.6, evidențiază valori corelate cu modulul volumic  $E_v$ , menționându-se faptul că valorile pentru pământul stabilizat sunt de 3-4 ori mai mari decât în cazul pământului netratat cu soluții enzimaticе.

## 5.5. Concluzii

Problematika stabilizării pământurilor cu enzime se constituie ca oportunitate eficientă pentru realizarea structurilor rutiere prin prelucrarea *in situ* a pământurilor locale, îmbunătățite cu agregate minerale și tratate cu lianți organici.

În acest context, se înscrie și prezenta lucrare ce etalează atât aspectul teoretic de modificare a modulului de elasticitate prin creșterea coeficientului lui Poisson, în funcție de doza de stabilizator, cât și rezultatele experimentale obținute *in situ* pe poligonul de încercări și în laborator.

Se menționează că au fost realizate etape experimentale *in situ* cu echipamente de frezare, amestecare și atomizare a stabilizatorului, depunerea straturilor de pământ prelucrat, cât și compactarea dinamică prin vibrație.

Experimentările au constat în prelevarea de probe ale pământului natural și ale straturilor de pământ stabilizat. De asemenea, încărcările dinamice din teren au permis determinarea modulelor elastice și a rigidităților. Capacitatea de rezistență a structurii rutiere s-a măsurat *in situ* prin determinarea indicelui californian CBR.

Pe baza rezultatelor analitice și experimentale pot fi sintetizate următoarele concluzii:

- stabilizatorii enzimatici în amestec atomizat și omogen cu pământul natural determină modificarea semnificativă a rezistenței, modulului elastic volumic, a coeficientului Poisson și a indicelui californian CBR;

- prezența stabilizatorului cu enzime în structura poroasă a pământurilor conduce la creșteri semnificative ale modulului și ale indicelui californian.

În consecință, tratamentul ecologic cu enzime poate asigura realizarea unor straturi rutiere din pământ stabilizat cu performanțe deosebite.



## CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII GENERALE DE CERCETARE

### 6.1. Concluzii

Problematica stabilizării pământurilor cu enzime se constituie ca oportunitate eficientă pentru realizarea structurilor rutiere prin prelucrarea *in situ* a pământurilor locale, îmbunătățite cu agregate minerale și tratate cu lianți organici.

În acest context, se înscrie și prezenta lucrare ce etalează atât aspectul teoretic de modificare a modulului de elasticitate prin creșterea coeficientului lui Poisson, în funcție de doza de stabilizator, cât și rezultatele experimentale obținute *in situ* pe poligonul de încercări și în laborator.

Se menționează că au fost realizate etape experimentale *in situ* cu echipamente de frezare, amestecare și atomizare a stabilizatorului, depunerea straturilor de pământ prelucrat, cât și compactarea dinamică prin vibrație.

Experimentările au constat în prelevarea de probe ale pământului natural și ale straturilor de pământ stabilizat. De asemenea, încărcările dinamice din teren au permis determinarea modulelor elastice și a rigidităților. Capacitatea de rezistență a structurii rutiere s-a măsurat *in situ* prin determinarea indicelui californian CBR.

Pe baza rezultatelor analitice și experimentale pot fi sintetizate următoarele concluzii:

- stabilizatorii enzimatici în amestec atomizat și omogen cu pământul natural determină modificarea semnificativă a rezistenței, modulului elastic volumic, a coeficientului Poisson și a indicelui californian CBR;

- prezența stabilizatorului cu enzime în structura proasă a pământurilor conduce la creșteri semnificative ale modulului și ale indicelui californian.

Contribuția fundamentală a monografiei constă în dezvoltarea de către autor a unui concept unitar și coerent de analiză destinat studiului interacțiunii rulou–teren în funcție de caracteristicile elastice, disipative și plastice ale mediilor analizate, cât și de comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional considerat.

**a)** În lucrare se evidențiază necesitatea dezvoltării și implementării unor modele reologice noi pentru pământuri stabilizate și a unor modele dinamice adecvate pentru obținerea unor informații cât mai apropiate de realitate. Așadar, s-a efectuat o analiză comparativă a comportării în regim static, dar în special în regim dinamic a echipamentului de compactat la interacțiune cu terenul, având la bază modele fizice, numerice, reologice și virtuale. S-au elaborat modele cu mai multe grade de libertate a unui compactor cu un rulou vibrator și s-au analizat modele reologice pentru diferite tipuri de terenuri (slab coezive sau coezive).

**b)** Testele instrumentale *in situ* completate cu o serie de încercări experimentale de laborator au asigurat o bază de date (stând la baza unui plan sistemic de analiză multicorelativă), care a fost eficientă în procesul de simulare numerică și virtuală a sistemului rulou vibrator–teren. Astfel, această bază de date este foarte benefică proceselor de armonizare comportamentală și cu atribuire parametrică a modelelor matematice/numerice furnizate cu realitatea identificabilă și măsurabilă a fenomenelor date.

**c)** Rezultatele numerice și scenariile virtuale au avut contribuție la fundamentarea setului de cerințe esențiale privind evaluarea răspunsului terenului și stării de solicitare indusă de echipamentul tehnologic.

**d)** Stabilirea și fundamentarea conceptului de validare a setului de modele de interfață propuse, în raport cu evaluarea nivelului de performanță impus gradului final de compactare, au condus la validarea modelelor. Caracterul parametrizat al concepției acestora asigură modelarea diferitelor tipuri de terenuri, număr de

treceri, grosimi de straturi și individualizarea fiecărui utilaj de compactare utilizat.

e) Simularea complexă a efectului cumulat provocat de trecerile succesive și evaluarea în adâncime a gradului de compactare pe întreaga zonă de interes cu estimarea dinamicii reale și cu baleierea acesteia pe întreaga zonă care este monitorizată.

f) Stabilirea corelațiilor de performanță parametrică.

Volumul mare de lucrări, printre care și procesul de compactare și de control al rezultatelor atinse, ce caracterizează realizarea construcțiilor din materiale locale, reclamă implicarea tehnologiilor de execuție cât mai performante ce determină într-un timp eficient calitățile cerute pentru materiale de către funcțiile amenajărilor respective.

Influența conținutului de apă în procesul de compactare, desfășurat în mod particular prin intermediul cilindrului vibrator netezi, este în general demonstrată și recunoscută în literatura de specialitate. Diversele rezultate ale testelor de compactare, prezentate în principal prin relația densitate în stare uscată–conținut de apă, dovedesc efectul major produs de acest parametru asupra gradului de compactare atins în compactarea pământurilor granulare fine. Cu toate acestea, în literatură nu sunt disponibile destule informații specifice pentru a putea dezvolta expresii generale care ar putea fi utile la estimarea prealabilă a rezultatelor practice ale lucrărilor de compactare.

Pentru a atinge un nivel de compactare corespunzător unui tip specific de pământ, aceste ecuații indică numărul necesar de treceri ale utilajului de compactare în funcție de tipul acestuia și de conținutul de apă al materialului compactat. Dar, chiar dacă expresiile respective se bazează pe teste efectuate cu diverse tipuri de utilaje, se pare că lipsa de informații clare face ca aplicarea lor să fie nesigură.

Răspunsul determinat analitic pentru sistemul material compactat–cilindru vibrator arată că variația conținutului de apă are

un efect important asupra deplasării pe verticală a cilindrului și, în consecință, asupra energiei absorbite de material.

Analiza numerică prin intermediul elementelor finite a comportării sistemului cilindru vibrator–material compactat a condus la rezultate care tind să urmărească în general răspunsul stabilit pe cale analitică.

Rezultatul principal reținut în urma analizei a fost deplasarea terenului pe verticală în zona de contact a acestuia cu cilindrul, această mărime fiind aleasă ca termen de comparație cu rezultatele obținute prin studiul analitic. S-a constatat că pentru cazul când frecvența naturală de oscilație a cilindrului nu se apropie de nivelul frecvenței de operare a dispozitivului vibrator, rezultatele obținute prin analiza numerică prezintă dispunerea preconizată și deci modelarea și procedeul de analiză, deși perfectibile, sunt totuși corespunzătoare. Pe de altă parte, având în vedere că în situația în care frecvența naturală menționată egalează frecvența de operare, curba deplasărilor determinate numeric nu mai prezintă alura corespunzătoare, ceea ce înseamnă că modelarea încărcării dinamice, respectiv procedeul de analiză aplicat, sunt deficitare.

## **6.2. Contribuții personale**

Contribuțiile personale ce reies din întreaga activitate de cercetare și prezentate în lucrare remarcă faptul că obiectivul general al activității de elaborare a unui set de modele aplicative, monitorizare, control parametric funcțional, interfața utilaj și material, cât și analizele de performanță pot fi sintetizate astfel:

**a)** Sinteza și clasificarea la nivel de performanță a realizărilor relevante atât pe plan național, cât și pe plan internațional în domeniul compactării cu vibrații a terenurilor.

**b)** Stabilirea unor modele reologice cu scopul implementării în sistemele instrumentale și informatice specializate pentru simularea interacțiunii rului vibrator–teren în procesul de compactare.

c) Analiza comportării în regim dinamic a modelelor reologice pentru evidențierea parametrilor specifici în legătură cu capacitatea acestora de a descrie realist procesul de compactare.

d) Conceperea, dezvoltarea și fundamentarea modelelor propuse, luând în considerare caracteristicile plastice, elastice și disipative ale terenului studiat și comportamentul dinamic al ansamblului structural și funcțional examinat.

Astfel, se menționează necesitatea modelării terenurilor stabilizate cu materiale de adaos cum ar fi: bitum, cenuși, ciment, enzime.

e) Corelarea funcțională a elementelor inerțiale, conservative și disipative cu scopul optimizării mărimilor parametrice de performanță evidențiate prin eficiența compactării dată de forța transmisă terenului.

f) Elaborarea unui program de cercetare a rezultatelor experimentale instrumentale *in situ* suplimentate cu o serie de încercări experimentale în laborator, pentru evidențierea influenței unor parametri funcționali, constructivi și tehnologici ai compactorului asupra gradului de compactare.

g) Conceperea unor legături funcționale între parametrii care descriu evoluția pământurilor (necoeziv, slab coeziv și balast) în procesul de compactare.

h) Stabilirea parametrilor de performanță în procesul de compactare a structurilor rutiere.

### **6.3. Direcții viitoare de cercetare**

Rezultatele obținute, ipotezele și studiile din cadrul tezei au menirea să sugereze următoarele direcții de cercetare pe viitor, cum ar fi:

- dezvoltarea unor modele performante pe baza modelelor neliniare complexe de variație față de parametrii constitutivi implicați în procesul de compactare;

- asigurarea măsurării cu exactitate a parametrilor monitorizați în timpul compactării cu folosirea aparatelor/sistemelor de măsură

de ultimă generație ce permit înregistrarea în timp real a datelor și variația acestora;

- realizarea unui sistem ce ar putea monitoriza în timp real, ce ar stoca și prelucra variația parametrilor semnificativi în procesul de compactare, posibilitatea de a automatiza procesul de reglaj/control *in situ* și caracteristicilor de lucru ale utilajului în dependență de răspunsul terenului;

- conceperea unui dispozitiv electric și informatic care să stabilească efectul cumulat al performanțelor în procesul de compactare cu decizie tehnică și economică.

Ca urmare, se menționează că domeniul comportării dinamice, fiind complex, prin varietatea materialelor, a echipamentelor dinamice și a metodelor instrumentale tot mai performante, rămâne deschis pentru cercetări continue privind atingerea eficienței și calității execuției de structuri rutiere;

- asigurarea unui sistem adecvat pentru determinarea gradului de compactare în timp real a pământurilor coezive, slab coezive stabilizate cu compuși organici naturali de tipul enzimelor.

În viitor se estimează o evoluție diversificată a stabilizării terenurilor pentru structurile rutiere, utilizând materiale de adaos de natură chimică sau organică (ecologică).

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Das, B.M. (1983). "Fundamentals of Soil Dynamics", Elsevier Science Publishing Co., New York.
- [2] D'Appolonia, D.J., D'Appolonia, E. (1967). "Determination of the maximum density of cohesionless soils", Proceedings, 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Israel, Vol.1.
- [3] D'Appolonia, E. (1970). "Dynamic Loadings", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 96 (SM1).
- [4] Ortigosa, P., Whitman, R.V. (1968). "Densification of Sand by Vertical Vibrations with Almost Constant Stress", Publication no 206, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [5] Krizek and Fernandez (1971) Soil Percent of mix Moisture content Modified Proctor.
- [6] Litwiniszyn, J., Stochastic methods in mechanics of granular bodies, Symp. Franco, Polonais, Varsovia, 1971.
- [7] Modiga, M., Introducere în mecanica mediilor continue și în mecanica microstructurală, Editura Tehnica, București, România, 2001.
- [8] Nowacwi, W.K, Problemes de la rheologie, Symposium Franco-Polonais, Varsovia, Edit. Inst. de rech. Fond. de la tehn. Acad. Pol. Des Sciences Varsovia, 1973.
- [9] Drucker, D.,C., Prager, W., Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Quart. Applied Math. Vol. 10, No. 2, pp. 157-165, 1952.
- [10] Sawczuk & Stutz, On formulation of stress-strain relations for at failure, ZAMP, no.19, pp. 677-778, 1968.
- [11] Bratu, P., Stabilirea regimului dinamic de funcționare a cilindrilor compactori vibratorii cu două trepte de amortizare, Studii și cercetări INCERC, nr. 5, 1974.
- [12] Lambe, T. W., Whitman, R. V., Soil mechanics, John Wiley & Sons, 553 pagini, 1969.

- [13] Rollings, M. P., Rollings, R. R., Geotechnical materials in construction, McGraw-Hill, 1996.
- [14] Proctor, R. R., Fundamentals principles of soil compaction”. Engineering news-record. Vol. 111, No. 9, 245-248, 1933.
- [15] Mihailescu, Șt., Bratu, P., Goran, V., Vlădeanu, A., Aramă, Ș., Mașini de construcții 2. Editura tehnică, București, România, 1985.
- [16] Holtz, R. D., State of the Art Report 8: Guide to Earthwork Construction, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1990.
- [17] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., An introduction to geotechnical engineering, Prentice Hall, 2010.
- [18] Zou, W., Wang, Z., Yao, Z., Effect of dynamic compaction on placement of highroad embankment, Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol. 19, No. 4, pp.316-323, 2005.
- [19] Mihăilescu, Șt., Zafiu, Gh., Gaidoș, A., Bratu, P., Vlădeanu, A., Mihăilescu, S., Tehnologii și utilaje pentru executarea, întreținerea și reabilitarea suprastructurilor de drumuri. Executarea suprastructurilor de drumuri, Editura Impuls, Vol. I, București, 2005.
- [20] Daniel, D., Benson, C.H., Water content-density criteria for compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 116, No.12, pp.1811-1830, 1990.
- [21] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., Evaluation of the Influence of Geogrid Reinforcement on soil Rotation and Stiffness in Compacted Based Course Soil, Transportation Research Record. No. 2116, 76 – 84, 2009.
- [22] Schuettpelz, C. C., Fratta, D., Edil, T. B., Mechanistic method for determining the resilient modulus of base course materials based on elastic wave measurements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 136, No. 8, pp.1086 -1094, 2009.
- [23] Richart, F. E., Hall, J. R., Woods, R. D., Vibrations of soils and foundations, Newmark, N. M., W. J. Hall, 414 pagini, 1970.



- [24] Santamarina, J. C., Soils and waves particulate materials behavior, characterization and process monitoring, Wiley, 2001.
- [25] Wolf, J.P. (1994).“Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [26] Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1971, 1972). „The Behavior of Shear Modulus and Damping Ratio for Soils”.
- [27] Mihăilescu, Șt., Zafiu, Gh., Gaidoș, A., Bratu, P., Vlădeanu, A., Mihăilescu, S., Tehnologii și utilaje pentru executarea, întreținerea și reabilitarea suprastructurilor de drumuri. Executarea suprastructurilor de drumuri, Editura Impuls, Vol. I, București, 2005.
- [28] Axinti, G., Axinti, A., S., Acționări hidraulice și pneumatice. Dinamica echipamentelor și sistemelor, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2008.
- [29] Axinti, G., Proceduri experimentale. Analiza experimentală asistată de calculator, Vol. 1, Editura Impuls, București, 2010.
- [30] Bărdescu, I., Studiul vibrațiilor la plăcile vibratoare pentru compactarea pământurilor. Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1971.
- [31] Bratu, P., Influența sistemului elastic de amortizare asupra parametrilor dinamici la cilindrii compactori vibratorii. Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1980.
- [32] Kolumban, V., Contribuții la optimizarea performanțelor mașinilor de compactare prin vibrare. Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2000.
- [33] Nicoară, Ș.V., Contribuții la compactarea mediilor poroase în construcțiile de retenție. Teză de doctorat, Universitatea “Politehnica” Timișoara, Facultatea de Hidrotehnică, 2003.
- [34] Mihăilescu, Șt., Bratu, P., Goran, V., Vlădeanu, A., Aramă, Ș., Mașini de construcții 2. Editura tehnică, București, România, 1985.
- [35] Peurifoy, R. L., Ledbetter, W. B., Construction planning, equipment and methods, 4th Ed., McGraw-Hill, New York, 1985.

- [36] Ganciu, T. Identificarea sistemelor, Editura Nord-Est, Iași, România, 1995.
- [37] Bratu, P., Vibrațiile sistemelor elastice, Ed. Tehnică, București, 2000.
- [38] Legendi, A., Bausic, F., Pavel, C., Panaitescu, L., Elemente de mecanică teoretică și analitică, Editura Matrix Rom, București, 2012.
- [39] Bratu, P., Mecanică teoretică, Ed. Impuls, București, 2006.
- [40] Bratu, P., Analyze of insulator rubber elements subjected to an actual dynamic regime, The 9th International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002.
- [41] Bratu, P., Analiza dinamică și optimizarea răspunsului pentru mașinile de compactat prin vibrație. Raport de cercetare științifică. MCInd, 1975.
- [42] Bratu, P., Criterii de alegere a caracteristicilor optime pentru compactoarele vibratoare autopropulsate. În: Revista Construcții nr.3, 1978.
- [43] Mihăilescu Șt., Bratu P., Goran V., Vlădeanu Al. Mașini de construcții. Calculul, construcția și încercarea mașinilor pentru lucrări de pământ. Vol.II, Editura Tehnică, București, 1985, Coordonatori: Șt. Mihăilescu, P. Bratu.
- [44] Bejan, S., Analiza performanței procesului de compactare dinamică prin vibrații pentru structuri rutiere. Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2015.
- [45] Panfiloiu, Gh., Sistem suport de decizie pentru analiza dinamică a modelelor reologice la compactarea prin vibrații. Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2013.
- [46] Căpățână G.-F., Analiza comportării dinamice a rulourilor compactoare vibratoare pentru lucrări de drumuri. Teză de doctorat, Universitatea „Dunarea de Jos” din Galați, 2013.
- [47] Bratu, P., Braguța E., Performanțe de rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime în procesul de compactare

prin vibrații, CONSILOX - 12, "Știința materialelor oxidice în slujba dezvoltării durabile", 16-20 septembrie 2016, Sinaia, ISSN 2285-6145.

- [48] Dobrescu C. F., Braguța E., Evaluarea parametrilor de rezistență și deformabilitate ai terenului pe baza încercărilor de laborator, Academia de Științe Tehnice din România și Universitatea Ovidius din Constanța, ZASTR 2017 6-7 octombrie, ISSN 2066-6586.
- [49] Dobrescu C. F., Braguța E., Optimization of Vibro-Compaction Technological Process Considering Rheological Properties, Acoustics and Vibration of Mechanical Structures-AVMS-2017, Proceedings of the 14th AVMS Conference, Timișoara, Romania, ISBN 978-3-319-69822-9, ISSN 0930-8989.
- [50] Dobrescu C. F., Braguța E., Evaluation of strength and deformation parameters of soil based on laboratory tests, Multi-Conference on Systems & Structures (SysStruc 17) din Universitatea Eftimie Murgu din Reșița 9-11 noiembrie 2017.
- [51] Pințoi R., Bordos R., Braguța E., Vibration Effects in the Process of Dynamic Compaction of Fresh Concrete and Stabilized Earth, Journal of Vibration Engineering & Technologies – Volume 5, decembrie 2017, ISSN 2321-3558.
- [52] Braguța E., Interacțiunea compactor-teren în procesul de vibrare, Conferința tehnico-științifică internațională „Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului”, 17-19 noiembrie 2016, Chișinău, ISBN 978-9975-71-854-9.
- [53] Condrat A., Ababii A., Braguța E., Tehnologii noi și utilaje pentru stabilizarea pământurilor cu folosirea stabilizatorilor pe bază de compuși organici naturali polienzimici, Conferința Științifică Internațională de Cercetare și Administrare Rutieră, “CAR 2015”, București, 9-11 iulie 2015.
- [54] Braguța E., Evaluarea parametrilor de răspuns ai compactorului vibrator în procesul de compactare a

pământurilor, SRMTA Conferința IMSAV - Brașov 23-24 noiembrie 2016.

- [55] Braguța E., Energia disipată în procesul de compactare a pământului stabilizat cu enzime în regim de vibrații staționare forțat, SRMTA Conferința IMSAV - Brașov 23-24 noiembrie 2016.
- [56] Rahman, F., Hossain, M. M., Hunt, M. M., Romanoschi, S., A., Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments, *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 31, No. 5, 442-451, 2008.
- [57] Nicolescu, L., *Technology of stabilizing grounds*, Publishing House Ceres, Bucharest, 1980.
- [58] Adam, D., *Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Roller*, *GeoEnvironment revue*, Bouazza, Balkema Rotterdam, 1997.
- [59] Adam, D., Kopf, F., *Sophisticated Roller Compaction Technologies and Roller-Integrated Compaction Control*, *Compaction of Soils-Granulates and Powders*, Ed. Kolymbas & Fellin, Rotterdam, 2000.
- [60] Adam, D., Kopf, F., *Theoretical analysis of dynamically loaded soils*, European Workshop: Compaction of soils and granular materials, ETC11 of ISSMGE, Paris, Franta, 2000.
- [61] Adam, D., Kopf, F., *Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)*, *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction*, Athens, Greece, pp. 97–106, 2004.
- [62] Ammann *Compaction Equipment*, Brochure, Ammann Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
- [63] Anderegg, R., *ACE AMMANN Compaction Expert – Automatic Control of the Compaction*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19<sup>th</sup>, pp. 229-236, 2000.

- [64] Axinti, A.S., Nastac, S., Axinti, G., *Virtual prototype for simulation and analysis of traction systems in interaction with roads*, The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XIV Mechanical Engineering, ISSN 1224 – 5615, pp. 63-70, 2008.
- [65] Axinti, G., Axinti, A., S., *A acționări hidraulice și pneumatice. Dinamica echipamentelor și sistemelor*, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2008.
- [66] Axinti, G., Axinti, A., S., *A acționări hidraulice și pneumatice. Baze de calcul, proiectare, exploatare, fiabilitate și scheme de acționare*, Vol. III, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2009.
- [67] Axinti, G., *Proceduri experimentale. Analiza experimentală asistată de calculator*, Vol. 1, Editura Impuls, București, 2010.
- [68] Bomag E, and Variocontrol, Technical Paper, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany.
- [69] Bowels, J. E., *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, McGraw Hill, 1979.
- [70] Bratu, P., *Influența sistemului elastic de amortizare asupra parametrilor dinamici la cilindrii compactori vibratorii*. Teză de doctorat. Institutul de construcții, București, 1980.
- [71] Bratu, P., *Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje*, Editura Tehnică, București, 1990.
- [72] Bratu, P., *Vibrațiile sistemelor elastice*, Ed. Tehnică, București, 2000.
- [73] Bratu, P., *Viscous nonlinearing for interval energy dissipation*, IJAV, Vol.4, Issue 4, pp.82-87, 2000.
- [74] Bratu, P., *Structural requirements imposed to vibration systems*, IJAV, Vol.5, Issue 2, pp.15-18, 2001.
- [75] Bratu, P., *Analyze of insulator rubber elements subjected to an actual dynamic regime*, The 9<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002.
- [76] Bratu, P., *The behavior of nonlinear viscoelastic systems subjected to harmonic dynamic excitation*, The 9<sup>th</sup> International

Congress on Sound and Vibration, University of Central Florida Orlando, Florida, 8 – 11 July, 2002.

- [77] Bratu, P., *Antivibrating systems having amplified deflection under loading*, Vibration Control and Transmissibility, pag. 271, The International Conference of RSA on Sound and Vibration, Bucharest, 14 - 17 Oct., 2004.
- [78] Bratu, P., *Dynamic response of nonlinear systems under stationary harmonic excitation*, *Non-linear acoustics and vibration*, 11-th International Congress on Sound and Vibration, 2767-2770, St. Petersburg, 5 - 8 July, 2004.
- [79] Bratu, P., *L'analyse énergétique d'un système visqueux-élastique linéaire excité par une force d'inertie unidirectionnelle*, International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Liberec, Czech Republic, pp.131–136, Aug.31 – Sept.2, 2004.
- [80] Bratu, P., *Méthodes expérimentales pour la détermination des caractéristiques élastiques et dissipatives aus systèmes antivibratiles en caoutchouc*, International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, pp.137–139, Liberec, Czech Rep., Aug. 31–Sept. 2, 2004.
- [81] Bratu, P., *Mecanică teoretică*, Ed. Impuls, București, 2006.
- [82] Bratu, P., *Elastic and damping parameters for vibration insulation system*, INTER-NOISE 2010, the 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Lisbon, Portugal, 13-16 June, 2010.
- [83] Bratu, P., *Dynamic analysis in case of compaction vibrating rollers intended for road works*, The 17th International Congress on Sound & Vibration, ICSV, Cairo, 18-22 July, 2010.
- [84] Bratu, P., Debeleac, C., *The analysis of vibratory roller motion*, Proceedings of the VII International Triennial Conference Heavy Machinery – HM 2011, Session Earth-moving and transportation machinery, Vrnjačka Banja, Serbia, 29 June -2 July, pp.23-26, ISBN 978-86-82631-58-3, 2011.

- [85] Brandl, H., Adam, D., *Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, September 6-12, vol.1, pp.31-36, Hamburg, Germany, 1997.
- [86] Brandl, H., Adam, D., *Flachendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen—Grundlagenforschung und praktische Anwendung (Continuous Compaction Control with Vibratory Rollers—Basic Research and Practical Application)*, Schriftenreihe der Strassforschung Heft 506, Forschungsvorhaben Nr. 3.147, Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 2000.
- [87] Briaud, J.-L., *Introduction to Soil Moduli*, Geotechnical News, BiTech Publishers Ltd, Richmond, B.C., Canada, 2001.
- [88] Constantinescu, V., *Tehnologii performante și echipamente pentru realizarea structurilor rutiere*, Editura Impuls, București, 2001.
- [89] Debeleac, C., Nastac, S., *On vibration exposure monitoring at industrial intensive pollutant areas*, Journal of Science and Arts, Year 10, No. 2 (13), pp. 319-326, 2010.
- [90] Debeleac, C., Nastac, S., *On Non-linear Characteristics Evaluation of Vibratory Tool and Terrain Interaction for Embankment Works*, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Bucuresti, 8 June 2012, ISSN 1842-8045, 2012.
- [91] Drucker, D.,C., Prager, W., *Soil mechanics and plastic analysis or limit design*, Quart. Applied Math. Vol. 10, No. 2, pp. 157-165, 1952.
- [92] Edil, T.B., Luh, G.-F., *Dynamic Modulus and Damping Relationships for Sands*, Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, CA, pp. 394-409, 1978.

- [93] Feng, Z., Fan, H., *Study on numerical simulation of rheological test of soft soil in Shanghai*, Journal of Tongji University, 31(4):379-382, 2003.
- [94] Forssblad, L., *Vibratory Soil and Rock Fill Compaction*, Robert Olsson Tryckeri AB, Stockholm, Sweden, 1981.
- [95] Floss, R. and Kloubert, H.-J., *Newest Developments in Compaction Technology*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, May 19<sup>th</sup>, pp. 247-261, France, 2000.
- [96] Gillich, G.R., Praisach, Z., Onchis, D.M., About the effectiveness of damage detection methods based on vibration measurements, EMESEG'10 Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Engineering mechanics, structures, engineering geology, pp. 204-209, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010.
- [97] Hardin, B.O., *The nature of Stress – Strain Behavior for Soils*, Proc. Of the ASCE Geotechnical Engineering Division, Special Conference Earthquake Engineering and Soil Dynamics, June 19-21, Pasadena, CA, 1978.
- [98] Harhuta, N., *Machines for Soil Compaction*, Mechanical Engineering, pp. 474-485, 1973.
- [99] Heersink, D. K., Furrer, R., *Sequential spatial analysis of large datasets with applications to modern earthwork compaction roller measurement values*. Submitted to Spatial Statistics, 2013.
- [100] Leopa, A., Debeleac, C., Năstac, S., *Simulation of Vibration Effects on Ground Produced by Technological Equipments*, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2012, Conference Proceedings, Vol. 5, Vol. 5, pp. 743-750, ISSN 1314-2704, 2012.
- [101] Leopa, A., Năstac, S., Debeleac, C., Căpățână, G.F., Potirniche, A., *Identification of parameters characterizing the nonlinear behavior of viscous-elastic systems on dynamic loadings*, The 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering", April 19-21, Tallinn, Estonia, 2012.



- [102] Litwiniszyn, J., *Stochastic methods in mechanics of granular bodies*, Symp. Franco, Polonais, Varsovia, 1971.
- [103] Lubking, P., *Soil Mechanics*, Lecture notes in Master Program on Underground Space Technology, IHE Delft, 1999.
- [104] Mooney, M.A., Rinehart, R.V. *Field Monitoring of Roller Vibration During Compaction of Subgrade Soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 3, pp. 257–265, 2007.
- [105] Mooney, M.A., Rinehart, R.V., *In-Situ Soil Response to Vibratory Loading and Its Relationship to Roller-Measured Soil Stiffness*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 8, pp. 1022–1031, 2009.
- [106] Mooney, M. A., Rinehart, R. V., White, D. J., Vennapusa, P. K., Facas, N. W., and Musimbi, O. M., *Intelligent soil compaction systems*, NCHRP project 21-09 final report, 2010.
- [107] Năstac, S., Leopa, A., *Comparative analysis of visco-elastic models with variable parameters*, Analele Universitatii "Eftimie Murgu" Resița, ANUL XVII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pp. 227-232, 2010.
- [108] Năstac, S., *On the increase of the isolation efficacy for the passive elastic devices by the structural configuration optimisation*, in 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Acoustics&Music: Theory&Applications, Bucharest, Romania, June 24-26, pp.83-88, 1997.
- [109] Nicoară, Ș.V., Constantin A.T., *Dynamic characteristics of sands*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1, 2001.
- [110] Nicoară, Ș.V., Constantin A.T., *Granular soils compaction by vibratory rollers*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1, 2001.
- [111] Nicoară, Ș.V., Constantin, A.T., *The influence of moisture content in the compaction of sand*, Buletinul Științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) – fasc.1, 2001.

- [112] Thurner, H.F., Sandström, A., *Continuous Compaction Control, CCC*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19<sup>th</sup>, pp. 237-246, 2000.
- [113] Vaicum, A., *Studiul reologic al corpurilor solide*, Editura Academiei Române, București, 1978.
- [114] Wolf, J.P., *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994;
- [115] Zou, W., Wang, Z, Yao, Z., *Effect of dynamic compaction on placement of highroad embankment*, Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol. 19, No. 4, pp.316-323, 2005.
- [116] Massarsch K.R., Fellenius B.H., Vibratory compaction of coarse-grained soils. *Can. Geotech. J.* 39(3), 25 (2001).
- [117] Mooney M.A., Gorman P.B., Gonzalez J.N., Vibration based health monitoring during earthwork construction. *Struct. Health Monit.* 2(4), 137–152 (2005).
- [118] Ter-Martirsyanyan Z.G., Ter-Martirsyanyan A.Z., Sobolev E.S., Vibration of embedded foundation at multi-layered base taking into account non-linear and rheological properties of soils. *Proc. Eng.* 153, 747–753 (2016).
- [119] Zafiu P., Technologies and equipment's for works mechanization (in Romanian) (Technical University of Civil Engineering, Bucharest, Romania, 2005).
- [120] Dobrescu C.F., Highlighting the change of the dynamic response to discrete variation of soil stiffness in the process of dynamic compaction with roller compactors based on linear rheological modelling. *Appl. Mech. Mater.* 801, 242–248 (2015).
- [121] Dobrescu C.F., in *The rheological behaviour of stabilized bioactive soils during the vibration compaction process for road structures*, Book of abstracts of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Italy, 2015; Technical University of Civil Engineering, Bucharest, Romania (2005).
- [122] Bratu, P., Ovidiu V., Bejan S., Analiza comportării dinamice a sistemului rulou vibrator–strat de material în procesul de compactare dinamică a căilor rutiere, a VI-a Conferință tehnico-

științifică internațională „Problemele actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului”, volumul III, 15-16 noiembrie 2012, ISBN 978-9975-71-315-3.

- [123]** Căpătâna, G.F., Debeleac, C., Năstac, S., On Dynamics of Vibratory Compactors based on Complex Interaction with Terrain, Annual Symposium Of The Institute Of Solid Mechanics - SISOM 2011 And Symposium of Acoustics, Academy Of Technical Sciences, Commission of Acoustics of Romanian Academy, Bucharest, Romania, May 26-27, 2011.
- [124]** Oprescu, Gh., Debeleac, C., Leopa, A., Nastac, S., On the rheological behaviour of the soil in the artificial compacting process, The Annals of „Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XIV Mechanical Engineering, ISSN 1224 – 5615, pp. 63-70, 2008.
- [125]** Debeleac, C., On the efficiency of compacting equipment, The Annals of „Dunarea de Jos” University of Galati, Vol.2, Issue XVI, Fascicle XIV Mechanical Engineering, ISSN 1224-5615, 2010, pp.51-54.
- [126]** Debeleac, C., On Computational Dynamics of Tool-Soil Interactions, Chapter 4 in Research Trends in Mechanics, vol. IV, Eds.: Munteanu L., Chiroiu V., Sireteanu T., Editura Academiei Romane, 2010, ISBN 978-973-27-1945-1, pp. 83-108.
- [127]** Carmen Debeleac and Silviu Nastac, Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process, PAMM, (14)1, Special Issue: 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Erlangen 2014; Editors: P. Steinmann and G. Leugering, Volume 14, Issue 1, pages 749–750, December 2014, Article first published online: 22 DEC 2014.
- [128]** Bratu, P., Alexandru, C., Compare analysis of dynamic response of an elastic-dissipative system with Voight-Kelvin or Maxwell Rheological buhavior, 20th ICSV, Bangkok, 7-11 nov., 2013.

- [129] Săvulescu, A., Controlul vibrațiilor de răspuns la echipamentele tehnologice în regim dinamic de funcționare. Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2016.
- [130] Dobrescu C.F., Analiza parametrică reologică a procesului de compactare dinamică a pământurilor în regim controlat de vibrații forțate, „Dezvoltarea durabilă favorabilă incluziunii”, Sibiu, 6-7 noiembrie 2014.
- [131] C. DOBRESCU, E. BRAGUȚA, A. BURAGA, „Analysis of complex vasco-elastic model with application to compactness the ecological stabilizing lands” International Technical and Scientific Conference "Current Problems of Urban Planning and Spatial Planning”, Chisinau, 2018.
- [132] C. DOBRESCU, S. BEJAN, R. BORDOS, E. BRAGUȚA, A. BURAGA, The influence of stabilized porosity on the modification of the dynamic rigidity module during the vibration compaction process, in The 43rd International Conference on „Mechanics of Solids” – ICMS 2019 – „P.P. Teodorescu” and The 8th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC – 2019, Brasov 21-22 November 2019.
- [133] C. DOBRESCU, E. BRAGUȚA, A. BURAGA, The technological significance of the laboratory determinations for the parameters of resistance and deformability of the ecologically stabilized lands for road works, in The 43rd International Conference on „Mechanics of Solids” – ICMS 2019 – „P.P. Teodorescu” and The 8th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC – 2019, Brasov 21-22 November 2019.
- [134] C. DOBRESCU, S. BEJAN, O. TONCIU, E. BRAGUȚA, Hysteretic reshaping of earths in the process of dynamic compaction, in The 7th edition of the Multi-Conference on Systems and Structures (SysStruc 2019), Resita 7-8 November 2019.

- [135] E. BRAGUȚA, „EXPERIMENTAL RESEARCHES REGARDING GROUNDS STABILIZED WITH ORGANIC BINDERS” *Journal of Engineering Science, Chișinău 2020*;
- [136] E. BRAGUȚA, C. DOBRESCU, „ASPECTS REGARDING EVALUATION OF COMPACTING PROCESS BY VIBRATION OF ENZYME-STABILIZED SOILS” *Journal of Engineering Science, Chișinău 2020*.

### Site-uri internet, cataloage de produse, documentații tehnice

- [1] \*\*\*, [www.bomag.com](http://www.bomag.com) accesat la data de 14.03.2018
- [2] \*\*\*, [www.ammann.com](http://www.ammann.com) accesat la data de 08.02.2018
- [3] \*\*\*, <http://www.cat.com> accesat la data de 15.02.2018
- [4] \*\*\*, [www.hamm.com](http://www.hamm.com) accesat la data de 15.02.2018
- [5] \*\*\*, ABG Brochure
- [6] \*\*\*, Bomag Brochure
- [7] \*\*\*, Catterpillar Brochure
- [8] \*\*\*, Ammann Brochure
- [9] \*\*\*, Hamm Brochure
- [10] \*\*\*, Vogel Brochure

### Standarde, normative

- [11] \*\*\*, Caietul 1 al Normativului privind îmbunătățirea terenurilor de fundare slabe, prin procedee mecanice, Indicativ C 29/1991. Buletinul construcțiilor nr. 8/1991.
- [12] SR EN 13286-2:2011. Teren de fundare. Determinarea caracteristicilor de compactare. Încercarea Proctor.
- [13] \*\*\*, Ghid pentru execuția compactării în plan orizontal și înclinat al terasamentelor, Indicativ GE-026-97.
- [14] \*\*\*, Infrastructura căilor de comunicație terestre.
- [15] CP D.02.22–2016 “Regulament privind lucrările de stabilizare a pământurilor cu stabilizatori pe bază de compuși organici naturali polienzimici”, Ediție oficială. Chișinău, 2016.

## ANEXA A

### Mărimi fundamentale implicate în fenomenul compactării

- Densitatea brută (stare umedă):

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_w + V_o}$$

în care:

$M$  este masa unui volum  $V$  de pământ dat;

$M_s$  și  $M_w$  sunt masa granulelor solide, respectiv masa apei în volumul de pământ considerat;

$V_s$ ,  $V_w$  și  $V_o$  sunt volumul granulelor solide, volumul apei și respectiv al aerului în volumul de pământ considerat.

- Densitatea părții solide:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

- Densitatea în stare perfect uscată:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_s + V_w + V_o}$$

- Densitatea în stare saturată:

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_v \rho_w}{V_s + V_v}$$

în care:

$V_v$  reprezintă volumul golurilor în volumul de pământ considerat;

$\rho_w$  reprezintă densitatea apei.

- Conținutul de apă:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (\%)$$

- Indicele porilor:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

- Porozitatea:

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

- Gradul de saturare:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{\rho_d \rho_s}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)} \quad (\%)$$

- Conținut de aer:

$$n_a = \frac{V_o}{V} \times 100 \quad (\%)$$

Relația de legătură dintre indicele porilor și porozitate:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{sau} \quad e = \frac{n}{1 - n}$$

Considerând un conținut de apă  $w$  și un conținut de aer  $n_o$ , densitatea în stare perfect uscată poate fi calculată prin intermediul următoarei expresii:

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_w (1 - n_o)}{\rho_s w + \rho_w}$$

Curba conținut de aer zero (numită și linia de saturare) este reprezentată prin intermediul următoarei ecuații în  $w$ :

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_s w + \rho_w}$$

Densitatea relativă a unei umpluturi de pământ necoeziv după compactare este determinată relativ la cele două densități de referință în starea perfect uscată, minimă și maximă. În practică, densitatea relativă se definește în două moduri:

- ca porozitate relativă:

$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \times 100 (\%)$$

- ca indice al densității:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 (\%)$$

în care:

$n_{\max}$  și  $n_{\min}$  sunt porozitatea maximă, respectiv minimă, determinate prin teste standard;

$e_{\max}$  și  $e_{\min}$  sunt indicele porilor maxim, respectiv minim, determinate prin teste standard;

$n$  și  $e$  sunt porozitatea, respectiv indicele porilor, *in situ*.

Relația de legătură dintre cele două este:

$$\frac{I_D}{D} = \frac{\rho_{d \max}}{\rho_d}$$

în care:

$\rho_{d \max}$  este densitatea maximă în stare perfect uscată determinată prin același test standard (de obicei testul Proctor) ca și  $n_{\min}$  și  $e_{\min}$ ;

$\rho_d$  este densitatea *in situ* în stare perfect uscată.

Gradul de compactare se definește prin intermediul următoarei relații:

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \times 100 (\%)$$