

CONTRIBUȚII LA COMPACTAREA MEDIILOR POROASE
ÎN CONSTRUCȚIILE DE RETENȚIE

- TEZĂ DE DOCTORAT -

Ș.L.Ing. *Șerban-Vlad NICOARĂ*

BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific de doctorat

Prof.Dr.Ing. *Gheorghe POPA*

637.059
259

TIMIȘOARA
- Februarie 2003 -

Apa constituie unul dintre elementele deficitare pe planeta noastră, atât prin calitatea ei, cât și prin modul de distribuție neuniform. Există zone în care lipsa apei necesare constituie un impediment, ca și alte zone în care surplusul temporar de apă, în perioadele de inundații, conduce la catastrofe. Fenomenul este tot mai evident în ultimii ani, extinzându-se parcă pe arii din ce în ce mai întinse. Încălzirea treptată a atmosferei, reducerea precipitațiilor medii, pun mari semne de întrebare referitor la corelația om – apă. După cum se știe, construcțiile de retenție, în primul rând barajele dar într-o oarecare măsură și digurile, realizează volume utile ce regularizează în timp debitele naturale oferind apa după necesități sau acumulează volume mari de apă în perioadele de viitură.

Construcțiile de retenție din pământ au fost primele realizate de om, ocupând și astăzi un loc important în grupa generală a construcțiilor de retenție. La concurență cu barajele realizate din beton, cele din pământ asigură pe lângă scopul în sine și o încadrare mai plăcută în mediul înconjurător. Este cert faptul că astfel de construcții vor fi realizate cu precădere și în viitor.

Dintre fazele tehnologice care conduc la realizarea unei astfel de lucrări, compactarea corespunzătoare a materialului granular constituie faza esențială deoarece ea asigură stabilitatea necesară. Tehnologiile se modernizează și în acest domeniu urmărind o optimizare tehnico – economică.

Prin lucrarea de față s-a urmărit un studiu fundamental al fenomenului fizic al compactării în regim dinamic, corelându-se comportarea utilajului de compactare cu caracteristicile mediului poros, respectiv performanțele ce trebuie atinse.

Țin să mulțumesc în mod deosebit Domnului Profesor Universitar dr.ing. Gheorghe POPA, conducătorul științific al tezei, care m-a îndrumat și încurajat cu multă răbdare pe tot parcursul realizării lucrării. Îi mulțumesc de asemenea pentru contribuția avută ca dascăl în formarea mea ca inginer, precum și pentru faptul că mi-a propus să activez în învățământul universitar, devenindu-i asistent.

Mulțumesc de asemenea Domnilor Profesori Universitari dr.ing. Alexandru DIACON, de la Universitatea Politehnica București, dr.ing. Adrian POPOVICI, Universitatea Tehnică de Construcții București, și dr.ing. Michael ION, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, pentru că au acceptat a-mi fi referenți, răpindu-și din timpul prețios pentru a analiza cele expuse de mine în teză.

Mulțumiri Domnului Conf.dr.ing. Adrian CARABEȚ, prodecanul Facultății de Hidrotehnică din Timișoara pentru că a acceptat să îndeplinească rolul de Președinte al Comisiei de Doctorat.

Mulțumiri Doamnei Profesor Universitar dr.ing. Felicia CIOMOCOȘ, titulara disciplinei de Rezistența Materialelor, ca și Domnului Profesor Universitar dr.ing. Aurel DĂNILESCU, titularul disciplinei de Statica Construcțiilor, care au devenit mentorii mei în ceea ce privește activitatea mea profesională și formarea ca dascăl.

Mulțumesc Domnului Conf.dr.ing. Gheorghe LAZĂR, Șeful Catedrei de Construcții Hidrotehnice, care m-a îndemnat și sprijinit permanent pe parcursul tezei, dar în special la aplicarea concretă a metodelor numerice.

Mulțumesc colegilor din cadrul Catedrei de Construcții Hidrotehnice în special, ca și tuturor colegilor din facultate, pentru atmosfera de studiu creată și încurajările exprimate.

Mulțumesc Institutului GeoDelft din Olanda, în cadrul căruia am efectuat un stagiul de pregătire în domeniul tezei.

Nu în ultimul rând mulțumesc Familiei mele, mamă și tată, soție și fiu, surori. Le mulțumesc pentru că în diverse perioade ale vieții m-au înconjurat cu mult drag și multă înțelegere, făcând sacrificii pentru ca eu să ajung aici.

Timișoara,
Decembrie 2002

Autorul

CUPRINS

Lista de figuri și tabele	1
Lista de simboluri utilizate	6
1 Introducere	8
2 Noțiuni generale referitoare la realizarea barajelor din materiale locale (12 - 19)	12
2.1 Principalele tipuri de baraje din materiale locale	13
2.2 Utilizarea materialelor granulare fine în corpul barajelor din materiale locale	17
3 Utilizarea cilindrului vibrator în compactarea materialelor granulare (20 - 68)	20
3.1 Compactarea materialelor granulare fine cu ajutorul cilindrului vibrator neted	
3.1.1 Noțiuni generale ale compactării dinamice	21
3.1.2 Prezentarea generală a cilindrilor vibratorii	25
3.1.3 Modelul matematic al cilindrului vibrator	27
3.1.4 Observații de laborator asupra compactării cu cilindrul vibrator	30
3.1.5 Modelarea solurilor necoezive încărcate dinamic vertical	32
3.2 Determinarea gradului de compactare obținut cu ajutorul cilindrului vibrator	
3.2.1 Metode clasice de control a compactării	38
3.2.2 Controlul continuu al compactării (CCC)	41
3.3 Influența conținutului de apă al unui material granular asupra rezultatului compactării	
3.3.1 Comportarea materialelor granulare umede supuse compactării	50
3.3.2 Efectul conținutului de apă în compactarea prin metode dinamice	53
3.4 Caracteristici dinamice ale nisipurilor	59

4	Determinarea prin teste de laborator a modului de rezistență la tăiere dinamică	(69 - 101)	69
4.1	Tipul materialului granular considerat în testele de laborator...		71
4.2	Prezentarea testelor de vibrare prin torsiune liberă (VTL)		
4.2.1	Pregătirea epruvetelor		75
4.2.2	Desfășurarea testelor VTL		79
4.3	Interpretarea rezultatelor testelor VTL		83
4.4	Compararea rezultatelor obținute cu valori calculate prin modelul empiric <i>Wu et.al. (1984)</i>		96
5	Stabilirea analitică a corelației dintre parametrul CCC și conținutul de apă al nisipului	(102 - 119)	102
5.1	Studiul analitic al modelului matematic considerat pentru sistemul cilindru vibrator – material compactat		
5.1.1	Cazul sistemului considerat cu un grad de libertate cinematică		104
5.1.2	Cazul sistemului considerat cu două grade de libertate cinematică		106
5.1.3	Studiul analitic al comportării deplasării verticale și energiei absorbite		107
5.2	Determinarea răspunsului unui sistem material compactat – cilindru vibrator		110
6	Analiza numerică a sistemului cilindru vibrator - material compactat	(120 - 138)	120
6.1	Noțiuni teoretice generale		
6.1.1	Starea de tensiuni și deformații într-un element finit oarecare		122
6.1.2	Caracteristici ale elementelor finite considerate în aplicație		124
6.1.3	Procedeul de analizare a comportării sistemului		126
6.2	Modelarea prin elemente finite a sistemului cilindru vibrator – material compactat		128
6.3	Prezentarea și interpretarea rezultatelor		130

7	Concluzii / Recomandări	(139 - 143)	139
	Contribuții personale		144
	Anexe		145
	Bibliografie		149
	Prezentarea sintetică a susținerii tezei		153

LISTA DE FIGURI

- Figura 2.1** Principalele tipuri de baraje din materiale locale
- Figura 2.2** Tipuri de baraje din materiale locale
- Figura 2.3** Etanșarea terenului de fundare la barajele din materiale locale
- Figura 2.4** Secțiune transversală prin Barajul Esmeralda
- Figura 2.5** Secțiune transversală prin Barajul Gura Apelor
- Figura 2.6** Secțiune transversală prin Barajul Nurek
- Figura 2.7** Secțiune transversală prin Barajul Cerna
- Figura 2.8** Secțiune transversală prin Barajul Măneciu
- Figura 2.9** Stabilirea curbei granulometrice a unui filtru pe baza criteriului U.S. Bureau of Reclamation
- Figura 2.10** Granulometria materialelor ce pot fi folosite în corpul barajelor
- Figura 3.1** Compoziția solului
- Figura 3.2** Compactarea dinamică a unui material granular prin aplicarea unei presiuni verticale ciclice, respectiv a unei accelerații verticale ciclice
- Figura 3.3** Variația porozității unui nisip uscat pe parcursul testelor de compresiune cu accelerație ciclică verticală
- Figura 3.4** Influența perioadei de vibrație în cazul compactării dinamice
- Figura 3.5** Excitarea cilindrului vibrator și a cilindrului oscilator
- Figura 3.6** Ajustarea direcției de excitare
- Figura 3.7** Optimizarea compactării
- Figura 3.8** Modelul matematic al sistemului sol – compactor
- Figura 3.9** Comportarea generală a sistemului sol – cilindru vibrator
- Figura 3.10** Dispozitiv pentru testarea în laborator a compactării cu cilindrul vibrator
- Figura 3.11** Rezultatul tipic al testelor cu dispozitivul la scară
- Figura 3.12** Relația curentă forță - compresiune pe parcursul unei treceri a cilindrului
- Figura 3.13** Relația curentă forță - compresiune corespunzătoare pentru n treceri a cilindrului
- Figura 3.14** Modelul conului semi-infinit elastic
- Figura 3.15** Deformația elasto-plastică a solului necoeziv sub impactul cilindrului
- Figura 3.16** Relația forță - deplasare în cazul comportărilor plastice ideale și elastice ideale
- Figura 3.17** Stabilirea punctuală a deformațiilor plastice și elastice ale solului
- Figura 3.18** Metoda înlocuirii cu nisip pentru determinarea densității in-situ
- Figura 3.19** Dispozitive de măsură a desității pe baza metodei nucleare
- Figura 3.20** Dispozitiv de testare a capacității portante a unei umpluturi din material granular sub încărcare statică

- Figura 3.21** Principiul sistemului de control continuu al compactării
- Figura 3.22** Principalele sisteme CCC
- Figura 3.23** Dispozitivul Compactometer
- Figura 3.24** Compactometer cu sistem de afișaj digital
- Figura 3.25** Sistemul CCC cu Terrameter
- Figura 3.26** Evoluția valorilor compactării dinamice ca funcții de modulul de tăiere dinamic
- Figura 3.27** Variația tipică a CMV în lungul unei fâșii de compactat
- Figura 3.28** Model de corelare între CMV și modulul de elasticitate obținut prin metoda încărcării statice capabile
- Figura 3.29** Limitele domeniului de operare pentru parametrii mecanismului vibrator
- Figura 3.30** Distribuția perechilor frecvență - amplitudine pentru operarea mecanismului vibrator
- Figura 3.31** Curbe $\rho_d - w$ stabilite prin teste Proctor (Scott, 1980)
- Figura 3.32** Rezultate tipice de teste Proctor (Parsons, 1992)
- Figura 3.33** Efectul conținutului de apă asupra comportării solurilor supuse compactării (Monahan, 1986)
- Figura 3.34** Sistemele de bază apă - aer - granule pentru sol nesaturat (Wu et.al., 1984)
- Figura 3.35** Influența grosimii stratului de compactat asupra relației densitate maxim obținută - conținut de apă (Parsons, 1992)
- Figura 3.36** Relația densitate maximă - conținut de apă în compactarea dinamică in-situ (Johnson, Sallberg, 1960)
- Figura 3.37** Relația densitate maximă - conținut de apă obținută prin teste de laborator (Selig, Yoo, 1977)
- Figura 3.38** Relațiile generale ale densității și rigidității cu conținutul de apă (Selig, 1982)
- Figura 3.39** Densitatea maximă în cazul distribuției neomogene a conținutului de apă în strat
- Figura 3.40** Rezultatele compactării cu cilindri vibratorii cu cilindrii netezi (grosimea stratului depășește 150 mm)
- Figura 3.41** Relația tensiune tăietoare - deformație specifică pentru sollicitarea dinamică
- Figura 3.42** Definiția modulului de rezistență la tăiere și a raportului de vâscozitate
- Figura 3.43** Variația modulului de rezistență și a raportului de vâscozitate cu deformația specifică
- Figura 3.44** Curba ipotetică tensiune - deformație specifică
- Figura 3.45** Influența diverșilor factori asupra parametrului K_1 , în cazul nisipurilor (Hardin, Drnevich, 1972)
- Figura 3.46** Variația modulului de rezistență la tăiere cu deformația specifică, în cazul nisipurilor (Hardin, Drnevich, 1972)

- Figura 3.47** Influența diverșilor factori asupra raportului de vâscozitate, în cazul nisipurilor saturate (Hardin, Drnevich, 1972)
- Figura 3.48** Variațiile modulului de rezistență și raportului de vâscozitate cu deformația specifică (Edil, Luh, 1978)
- Figura 3.49** Variația modulului de rezistență cu gradul de saturare și presiunea efectivă, în cazul deformațiilor specifice joase (Wu, Gray, Richart jr., 1984)
- Figura 3.50** Valorile maxime ale raportului dintre G_o și $G_{o(uscat)}$ în raport cu mărimea granulelor
- Figura 3.51** Variația raportului dintre G_o și $G_{o(uscat)}$ cu gradul de saturare și deformația specifică, în cazul deformațiilor specifice joase (Wu, Gray, Richart jr., 1985)
- Figura 4.1** Curba granulometrică a nisipului considerat pentru testele de laborator
- Figura 4.2** Dispozitivul testului Proctor standard
- Figura 4.3** Curba $\rho_d - w$ obținută prin testele Proctor standard
- Figura 4.4** Relațiile $D_c - w$ și $D_r - w$ determinate de rezultatele testelor
- Figura 4.5** Elementele componente la pregătirea epruvetei
- Figura 4.6** Umplerea carcasei pentru construirea epruvetei de nisip
- Figura 4.7** Compactarea nisipului din epruvetă
- Figura 4.8** Epruvetă pregătită pentru efectuarea testului VTL
- Figura 4.9** Prezentarea schematică a dispozitivului VTL
- Figura 4.10** Dispozitivul VTL pregătit pentru desfășurarea testului
- Figura 4.11** Detaliu de cuplare a epruvetei la partea superioară
- Figura 4.12** Detaliu al acului împingător
- Figura 4.13** Vedere generală a dispozitivului integrat VTL
- Figura 4.14** Tipul rezultatului măsurat al testelor VTL (test D84w8m5)
- Figura 4.15** Rezultatul tipic modificat al testelor VTL (test D84w8m5)
- Figura 4.16** Deformația specifică unghiulară tipică a epruvetei
- Figura 4.17** Deformația specifică extremă medie / ciclu
- Figura 4.18** Variația frecvenței naturale de oscilație cu conținutul de apă
- Figura 4.19** Frecvența naturală de oscilație medie
- Figura 4.20** Nivelul frecvenței naturale în raport cu valoarea corespunzătoare stării complet uscate
- Figura 4.21** Variația modulului de rezistență la tăiere maxim cu conținutul de apă
- Figura 4.22** Modulul de rezistență la tăiere mediu
- Figura 4.23** Nivelul modulului de rezistență la tăiere maxim în raport cu valoarea corespunzătoare stării complet uscate
- Figura 4.24** Variația modulului de rezistență la tăiere adimensional cu conținutul de apă, situația desnității scăzute
- Figura 4.25** Variația modulului de rezistență la tăiere adimensional cu conținutul de apă, situația desnității ridicate

- Figura 4.26** Relația de legătură $G_o - f_n$ obținută pe baza rezultatelor testelor
- Figura 4.27** Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 0 kg masa greutăților adiționale
- Figura 4.28** Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 2×5 kg masa greutăților adiționale
- Figura 4.29** Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 2×10 kg masa greutăților adiționale
- Figura 4.30** Relația $G_o - S_r$, situația 2×5 kg masa greutăților adiționale
-
- Figura 5.1** Variația modulului de rezistență la tăiere cu conținutul de apă
- Figura 5.2** Variația coeficientului de elasticitate cu conținutul de apă
- Figura 5.3** Variația coeficientului de vâscozitate cu conținutul de apă
- Figura 5.4** Variația frecvențelor naturale de oscilație cu conținutul de apă
- Figura 5.5** Variația amplitudinii cilindrului neted cu conținutul de apă
- Figura 5.6** Variația energiei absorbite cu conținutul de apă
-
- Figura 6.1** Definirea vectorului tensiunilor
- Figura 6.2** Structura elementului finit de tipul PLANE182 și starea de tensiune atașată acestuia
- Figura 6.3** Direcțiile deplasărilor elementului finit PLANE182
- Figura 6.4** Poziția punctelor de integrare numerică pe elemental PLANE182
- Figura 6.5** Elementul finit resort-piston COMBIN14
- Figura 6.6** Direcțiile deplasărilor elementului COMBIN14
- Figura 6.7** Elementele de contact TARGE169 și CONTA172
- Figura 6.8** Modelarea prin elemente finite a sistemului cilindru vibrator – material compactat
- Figura 6.9** Spectrul deplasării maxime pe verticală pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică
- Figura 6.10** Spectrul deplasării maxime pe verticală pentru sistemul cu un grad de libertate cinematică
- Figura 6.11** Spectrul tensiunii normale pe verticală pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică
- Figura 6.12** Spectrul tensiunii normale pe verticală pentru sistemul cu un grad de libertate cinematică
- Figura 6.13** Detaliu în spectrul deplasării maxime pe verticală pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică
- Figura 6.14** Detaliu în spectrul tensiunii normale pe verticală pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică
- Figura 6.15** Variația deplasării maxime pe verticală cu conținutul de apă în cazul materialului cu densitate joasă
- Figura 6.16** Variația deplasării maxime pe verticală cu conținutul de apă în cazul materialului cu densitate ridicată

Figura 6.17 Variația deplasării pe verticală pe parcursul unei perioade de oscilație

Figura 6.18 Variația tensiunii normale pe verticală pe parcursul unei perioade de oscilație

LISTA DE TABELE

Tabelul 3.1 Condițiile de operare ale cilindrului vibrator

Tabelul 4.1 Rezultatele testelor Proctor standard

Tabelul 4.2 Caracteristicile epruvetelor de nisip pregătite pentru testele VTL

Tabelul 4.3 Calculul deformației specifice unghiulare, a perioadei de vibrație și a decrementului logaritm (testul D84w8m5)

Tabelul 4.4 Rezultatele calculate ale testelor D84w0m0 până la D84w12m0

Tabelul 4.5 Rezultatele calculate ale testelor D90w0m0 până la D90w12m0

Tabelul 4.6 Rezultatele calculate ale testelor D84w0m5 până la D84w12m5

Tabelul 4.7 Rezultatele calculate ale testelor D90w0m5 până la D90w12m5

Tabelul 4.8 Rezultatele calculate ale testelor D84w0m10 până la D84w12m10

Tabelul 4.9 Rezultatele calculate ale testelor D90w0m10 până la D90w12m10

Tabelul 4.10 Comparăție rezultate, testele D84w0m0 până la D84w12m0

Tabelul 4.11 Comparăție rezultate, testele D90w0m0 până la D90w12m0

Tabelul 4.12 Comparăție rezultate, testele D84w0m5 până la D84w12m5

Tabelul 4.13 Comparăție rezultate, testele D90w0m5 până la D90w12m5

Tabelul 4.14 Comparăție rezultate, testele D84w0m10 până la D84w12m10

Tabelul 4.15 Comparăție rezultate, testele D90w0m10 până la D90w12m10

Tabelul 5.1 Deplasări obținute analitic, densitate redusă

Tabelul 5.2 Deplasări obținute analitic, densitate ridicată

Tabelul 6.1 Comparăție deplasări, densitate joasă

Tabelul 6.2 Comparăție deplasări, densitate ridicată

LISTA DE SIMBOLURI UTILIZATE

Mărimile și parametrii ce apar în lucrarea de față sunt reprezentați prin intermediul următoarelor simboluri:

- ρ_s, ρ, ρ_d - densitatea specifică a părții solide, densitatea brută, respectiv densitatea în stare perfect uscată, pentru pământuri;
- m, m_d - masa brută, respectiv masa în stare perfect uscată a epruvetei de pământ;
- h - înălțimea epruvetei;
- n - porozitatea pământului;
- e - indicele porilor pământului;
- n_a - conținutul de aer al pământului;
- C_u - coeficientul de uniformitate al pământului;
- C_c - coeficientul de curbură;
- ν - coeficientul lui Poisson pentru pământ;
- D_{10}, D_{30}, D_{60} - diametrul maxim al granulei de pământ pentru 10%, 30%, respectiv 60% din volumul considerat;
- w, w_{opt} - conținutul de apă curent, respectiv conținutul de apă optim al pământului;
- $S_r, S_{r(opt)}$ - gradul de saturare curent, respectiv gradul de saturare optim al pământului;
- D_c - gradul de compactare al pământului;
- D_r - densitatea relativă a pământului (în termeni de porozitate);
- $G, G_o, G_{o(dry)}$ - modulul de rezistență la tăiere, modulul de rezistență maxim la tăiere, respectiv modulul de rezistență maxim la tăiere corespunzător stării perfect uscate;
- a - modulul de rezistență adimensional la tăiere;
- γ, γ_r - deformația specifică unghiulară, respectiv deformația specifică unghiulară de referință;
- δ - decrementul logaritmic;
- D - raportul de vâscozitate;
- T - perioada de oscilație a mișcării;
- f_n, f - frecvența naturală, respectiv frecvența de operare;
- ω_n, ω - frecvența circulară naturală, respectiv frecvența circulară de operare;
- v_s, v_p - viteza undelor tăietoare, respectiv viteza undelor longitudinale;
- $m_{arm}, m_{alt}, m_{sup}, m_{nul}$ - masa brațului de acționare, masa greutateilor adiționale, masa suporturilor și masa piulițelor de prindere pe braț;
- l_{arm}, l_{alt} - lungimea brațului de acționare, respectiv brațul greutateilor adiționale;

- $J_s, J_{arm}, J_{sup}, J_{att}$ - momentul de inerție polar al epruvetei, al brațului de acționare, al suporturilor, respectiv al greutateților adiționale;
- α - parametru;
- σ'_m - tensiunea normală medie principală;
- H, H_1, H_2 - parametrii în modelul *Wu et.al.*;
- m_r, m_d, m_e, m_f - masa corpului frontal al utilajului de compactare, masa cilindrului, masa greutateților excentrice, masa cadrului de susținere;
- e - brațul excentricităților;
- z (sau z_d), z_f - deplasarea verticală a cilindrului, respectiv a cadrului;
- Z (sau Z_d) - amplitudinea deplasării verticale a cilindrului;
- z_ϕ, z_p - tasarea elastică, respectiv plastică, a terenului sub cilindru;
- k, k_t - coeficienții de rigiditate pentru teren, respectiv pentru sistemul de susținere a cilindrului;
- c, c_t - coeficienții de vâscozitate pentru teren, respectiv pentru sistemul de susținere a cilindrului;
- F_s - forța de interacțiune cilindru - teren;
- k_p - coeficient de rigiditate plastic;
- F_D, F_o - forța dinamică de acționare, respectiv amplitudinea acesteia;
- ϕ - defazaj;
- U, V - constante;
- W - energia absorbită de sol;
- a, b - dimensiunile amprentei cilindrului pe teren;
- A - suprafața amprentei cilindrului pe teren;
- g - accelerația gravitațională;
- σ_y - tensiunea normală în lungul axei verticale în modelarea prin elemente finite;
- ε - deformația specific longitudinală;
- E - modulul de elasticitate longitudinal;
- u_y - deplasarea pe verticală a nodurilor rețelei de discretizare;
- Z' (sau $Z'd$) - amplitudinea deplasării pe verticală în modelarea prin elemente finite.

*Capitolul 1***INTRODUCERE**

În mod obișnuit pământul, fie ca material de fundare a unei construcții, fie ca material propriuzis de construcție, nu este ideal din punctul de vedere al inginerului în domeniu. Uzual, această problemă este 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. Deseori folosită pentru densificarea pământului, *compactarea dinamică* este de multă vreme aplicată în cazul diferitelor tipuri de pământuri, dar lucrarea de față se ocupă numai cu densificarea *materialelor granulare fine (nisipurilor)*. Compactarea de suprafață a pământurilor necoezive se poate realiza foarte eficient cu ajutorul *cilindrilor vibrator*, acestea fiind utilaje de compactare cu cilindrii 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 pentru obținerea proprietăților dorite pentru materialul în cauză, 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 – CCC*.

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

Din rândul construcțiilor realizate din umpluturi, atât prin importanța deținută în dezvoltarea societății umane cât și prin volumul considerabil de lucrări, se remarcă *barajele și digurile realizate din materiale locale*.

Pornind de la observațiile enunțate mai sus, prezenta teză studiază *relația dintre sistemul integrat de control continuu al compactării și conținutul de apă al unui pământ granular utilizat la realizarea unei umpluturi*.

Având scopul menționat, teza a fost dezvoltată pe parcursul a șapte capitole, după cum urmează: **Introducere, Noțiuni Generale Referitoare la Realizarea Barajelor din Materiale Locale, Utilizarea Cilindrului Vibrator în Compactarea Materialelor Granulare, Determinarea prin Teste de Laborator a Modulului de Rezistență Dinamic la Tăiere, Stabilirea Corelației Analitice dintre Parametrul CCC și Conținutul de Apă al Nisipului, Analiza numerică a sistemului cilindru vibrator - material compactat, Concluzii/Recomandări.**

Capitolul de **Noțiuni Generale Referitoare la Realizarea Barajelor din Materiale Locale** prezintă o clasificare generală a barajelor din materiale locale, precum și o scurtă enumerare a câtorva baraje în corpul cărora sunt cuprinse și materiale granulare fine. Deasemenea, se prezintă rolul general al fiecărui tip de material din corpul unui baraj de umplură, punând accent asupra materialelor granulare fine. În final, se remarcă faptul că materialul granular fin considerat în prezentul studiu, fie se încadrează în domeniul corespunzător pentru realizarea filtrelor inverse la barajele din materiale locale neomogene, fie se poate utiliza la realizarea barajelor de umplură omogene de mică înălțime, a digurilor de închidere laterale sau de protecție a polderelor.

Capitolul **Utilizarea Cilindrului Vibrator în Compactarea Materialelor Granulare** cuprinde, pe baza studiului literaturii de specialitate în domeniu, o selecție de informații care încearcă să ofere un fundal corespunzător pentru studiul subiectului specific al efectului conținutului de apă asupra caracteristicilor dinamice ale nisipului și, în consecință, asupra parametrilor CCC.

În primul paragraf al capitolului este prezentat conceptul de bază al fenomenului compactării nisipului, punând accent asupra comportării sub acțiunea încărcării dinamice. Deasemenea este descris principiul de lucru al cilindrului vibrator neted, împreună cu modelul matematic general considerat pentru acest sistem de compactare. Forța de interacțiune material compactat – cilindru vibrator este obținută prin modelare elasto – plastică a pământului necoeziv încărcat dinamic vertical.

În paragraful următor este prezentat principiul de bază al sistemului de Control Continuu al Compactării (CCC), fiind descrise cele două sisteme CCC aplicate în practică la ora actuală: sistemul Compactometer, care stabilește parametrii denumiți CompactoMeter (CMV) și ResonantMeter (RMV), respectiv sistemul Terrameter, care stabilește un parametru denumit OMEGA.

Cel de al trei-lea paragraf prezintă comportarea generală a nisipului umed pe parcursul procesului de compactare, fiind prezentate și rezultatele câtorva teste de compactare cu cilindrul vibrator efectuate de diverși cercetători în vederea studierii influenței conținutului de apă. Observațiile obținute din literatură dovedesc efectul semnificativ determinat de conținutul de apă în compactarea dinamică.

Ultimul paragraf al capitolului în discuție, cuprinde definirea principalelor caracteristici dinamice ale pământurilor, modulul de rezistență la tăiere și raportul de vâscozitate, precum și o prezentare a parametrilor ce le influențează comportarea. Sunt prezentate trei modele empirice care estimează modulul de rezistență la tăiere în funcție de diverși parametrii (i.e. presiunea efectivă, indicele porilor, densitatea în stare uscată, gradul de saturare, caracteristicile granulelor). Dintre aceste modele, cel mai

interesant pentru subiectul prezentei lucrări este cel dezvoltat de Wu et.al., care ia în considerare gradul de saturare al nisipului.

În capitolul **Determinarea prin Teste de Laborator a Modulului de Rezistență la Tăiere Dinamică** sunt prezentate procedura și rezultatele a două serii de teste de Vibrare prin Răsucire Liberă (VRL), efectuate pentru deformații specifice unghiulare joase ($< 0.02 \%$), asupra unui nisip comun în vederea stabilirii variației modulului de rezistență la tăiere dinamică în funcție de câțiva parametri importanți (conținutul de apă, densitatea în stare uscată, frecvența naturală de oscilație).

Atât determinarea prealabilă a caracteristicilor fundamentale ale materialului granular considerat, cât și testele VRL, au fost realizate în cadrul Laboratorului GeoDelft (Olanda). Materialul studiat a fost un nisip fin (prăfos), uniform (slab) gradat. Relația densitate maximă în stare uscată - conținut de apă a fost stabilită prin intermediul testelor Proctor standard, indicând un conținut de apă optim de cca 12% , respectiv conținutul de apă de cca 4% la care densitatea prezintă valoarea minimă. Testele VRL au fost efectuate pe epruvete de nisip pentru cinci niveluri ale conținutului de apă (0 , iar apoi cca 4 , 6 , 8 și 12%), respectiv la două valori ale densității în stare uscată (cca 1.52 și 1.64 gr/cm^3). Epruvetele au fost vibrat liber prin torsiune la trei niveluri diferite ale frecvenței de oscilare. Modul de preparare al epruvetelor, respectiv procedura generală de desfășurare a testelor VRL sunt prezentate în cel de al doi-lea paragraf al capitolului. În total au fost efectuate 30 de teste, asupra epruvetelor ce prezentau caracteristicile dorite.

Pe baza rezultatelor testelor, reprezentând ciclogramele deplasare – timp, au fost determinate perioada de oscilație și raportul de vâscozitate, iar apoi a fost calculată frecvența naturală de oscilație. Modulul maxim la tăiere dinamică corespunzător fiecărei epruvete a fost determinat ca o funcție de parametri considerați $G_o = f(w, \rho_d, f_n)$. Graficele rezultate prezintă comportarea frecvenței naturale de oscilație și a modulului de rezistență la tăiere cu conținutul de apă și densitatea în stare uscată, respectiv relația modul de rezistență - frecvență naturală.

Valorile modulului de rezistență maxim la tăiere dinamică obținute pe baza rezultatelor testelor au fost comparate cu valori ale aceleași mărimi calculate prin intermediul modelului *Wu et.al.* aplicat pentru aceleași condiții. S-a observat că în general este atinsă o bună corelație.

Stabilirea Analitică a Corelației dintre Parametrul CCC și Conținutul de Apă al Nisipului a fost studiată considerând energia absorbită de sol pe parcursul procesului de compactare dinamică, mărime ce este indicată prin sistemul de control continuu al compactării de tipul Terrameter.

Modelul matematic al sistemului material compactat – cilindru vibrator este dezvoltat analitic pentru ambele situații de simulare posibile: sistem cu unul, respectiv cu două grade de libertate cinematică. Pentru ambele

situații energia absorbită de materialul compactat este obținută ca o funcție de amplitudinea mișcării cilindrului vibrator, de coeficienții de rigiditate și vâscozitate ai nisipului, de frecvența de vibrație. Având în vedere relația modul de rezistență la tăiere – conținut de apă, se obține corelația energiei absorbite cu conținutul de apă.

Aplicația practică consideră un utilaj de compactare de tip CH-43 cu cilindru vibrator neted, ce lucrează asupra unei umpluturi de nisip cu caracteristicile celui adoptat pentru testele de laborator. Astfel a fost determinat răspunsul sistemului la variația conținutul de apă. Se face mențiunea că în aplicația practică din acest capitol s-a ținut cont numai de componenta elastică a deformării materialului, neglijându-se contribuția comportării plastice. Calculele au fost efectuate pentru aceleași două valori ale densității în stare uscată dispuse la epruvetele testate în laborator. Variația modulului de rezistență la tăiere dinamică cu conținutul de apă a fost determinată cu ajutorul modelului *Wu et.al.* Rezultatele obținute din calculele analitice desfășurate pot servi ca un ghid util în estimarea procesului practic de compactare pentru diferite condiții de teren referitoare la conținutul de apă.

În capitolul **Analiza Numerică a Sistemului Cilindru Vibrator - Material Compactat** este prezentat răspunsul sistemului respectiv obținut în urma modelării prin elemente finite cu programul ANSYS. Modelul a fost analizat în plan, pe parcursul unei singure perioade de oscilație, pentru aceleași condiții practice cu cele considerate în studiul analitic prezentat în capitolul anterior. Materialul asupra căruia acționează cilindrul a fost considerat deasemenea cu comportare elastică, iar încărcarea dinamică produsă de dispozitivul vibrator a fost modelată în trepte. Sistemul a fost discretizat utilizând elemente finite tetraedrice PLANE182, un element vâscoelastic COMBIN14 pentru modelarea lagărului de cuplare a cilindrului cu cadrul de susținere, respectiv o pereche de elemente pentru modelarea zonei de contact cilindru – teren TARGE169 și CONTA172.

În vederea comparării cu situația reflectată în urma studiului analitic menționat, din rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite au fost reținute în principal deplasările terenului pe verticală în zona de contact a acestuia cu cilindrul. Pe baza graficelor comparative stabilite se poate spune că programul ANSYS oferă posibilitatea modelării și analizării comportării sistemului format din utilajul de compactare cu cilindru vibrator și materialul granular fin, dar pentru obținerea unor rezultate cât mai apropiate de situația reală, sunt necesare câteva reconsiderări în modul de abordare a problemei (discretizare mai fină a materialului compactat, modelarea încărcării dinamice direct prin funcția sinusoidală, stabilirea răspunsului sistemului pe parcursul mai multor perioade de oscilație consecutive, modelarea comportării elasto-plastice a materialului compactat).

Capitolul 2

NOȚIUNI GENERALE REFERITOARE LA REALIZAREA BARAJELOR DIN MATERIALE LOCALE

Cea mai veche categorie de baraje construite de om este reprezentată de barajele din materiale locale (sau din umpluturi). Așa cum denumirea lor sugerează, barajele din materiale locale sunt realizate din materiale naturale, existente în apropierea amplasamentului, și anume piatră (bolovani sau anrocamente de carieră) sau pământ (balast, nisip, argilă).

În funcție de materialele de umplură adoptate pentru alcătuirea corpului lor, respectiv în funcție de zona acestor materiale, se disting câteva tipuri de baraje din materiale locale. Astfel, în primul paragraf al acestui capitol se prezintă o clasificare generală a barajelor din materiale locale. Deasemenea, având în vedere că lucrarea de față se referă la materialele necoezive (granulare) fine care intră în alcătuirea categoriei de baraje în discuție, paragraful cuprinde și o scurtă enumerare a câtorva baraje în corpul cărora este cuprins și acest material.

Paragraful al doi-lea prezintă rolul fiecărui tip de material în corpul barajului, punând accent asupra materialelor granulare fine. Deasemenea, se prezintă calitățile pe care aceste materiale trebuie să le îndeplinească.

Având în vedere granulometria materialului a cărui comportare la compactare dinamică este studiată în lucrarea de față (vezi capitolul 4), se remarcă faptul că acest material se încadrează în domeniul corespunzător pentru realizarea filtrelor inverse în corpul barajelor din materiale locale neomogene, dar deasemenea, printr-o compactare corespunzătoare, cu acest material se pot realiza diguri de închidere laterale, diguri de protecție a polderelor, precum și baraje de umplură omogene de mică înălțime.

Întrucât construcțiile din materiale locale (baraje, diguri sau alte umpluturi) sunt întotdeauna caracterizate de volume foarte mari de lucrări, este necesar ca la realizarea acestora să fie implicate tehnologii de execuție (inclusiv de compactare și de control al rezultatului compactării) cât mai performante, ce determină într-un timp eficient calitățile cerute pentru materiale.

2.1 Principalele tipuri de baraje din materiale locale

Prin definiție (Popovici, 2002) un baraj din materiale locale are corpul alcătuit din materiale excavate, fie din amplasamentul barajului fie din imediata vecinătate a acestuia, fără adaosuri de alte materiale de legătură. Prin convenție, această definiție acoperă și barajele din umpluturi având etanșări din materiale prelucrate, cum ar fi din beton, beton armat, beton bituminos, torcret, metal, lemn sau mase plastice.

Materialele naturale considerate în realizarea corpului unui baraj de umplutura se clasifică în două categorii: piatră (anrocamente, bolovani) și pământuri (balast, nisip, nisip argilos, argilă nisipoasă, argilă). În cazul când un material de tipul nisip argilos prezintă în anumite condiții de compactare calitățile necesare din punctul de vedere al impermeabilității și al rezistenței la alunecare, acesta poate alcătui singur corpul unui baraj omogen (fig. 2.1.a). Totuși mult mai răspândite sunt barajele de umplutură la care cele două funcțiuni, rezistența la alunecare și etanșarea, sunt îndeplinite de două materiale distincte. Acestea sunt baraje de tip neomogen (fig.2.1.b și c), în funcție de dispunerea elementului de etanșare distingându-se baraje cu mască (ecran) sau baraje cu nucleu (diafragmă, sâmbure).

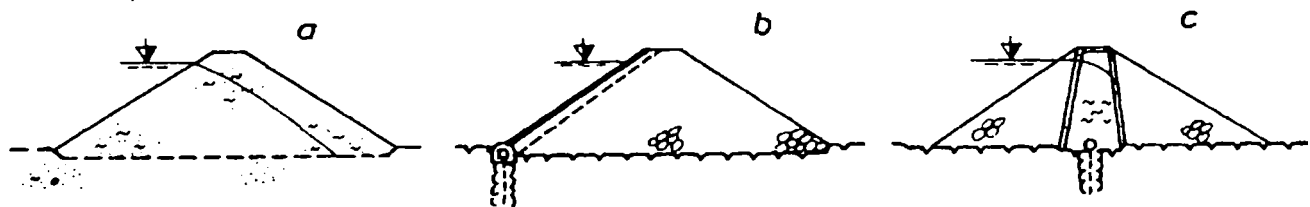


Figura 2.1 Principalele tipuri de baraje din materiale locale
a. omogen, b. cu mască, c. cu nucleu

O clasificare mai detaliată a barajelor neomogene poate fi reprezentată conform figurii 2.2.

Pentru a limita pierderile de apă din laculul de acumulare prin infiltrații pe sub corpul barajului din materiale locale, sistemul de etanșare se prelungește în fundație (inclusiv pe versanți). În cazul barajelor din materiale locale fundate pe roci stâncoase, etanșarea de adâncime se realizează în general sub formă de voal de injecții (fig.2.3.a). În cazul când terenul de fundare este nestâncos, etanșarea de adâncime a barajelor din materiale locale se realizează în general sub formă de pinteni sau pereți mulați (fig.2.3.b), iar uneori, dacă roca de bază se află la adâncime foarte mare, sub formă de avantradier din material argilos (fig.2.3.c).

În continuare se prezintă pe scurt câteva baraje din materiale locale, în corpul cărora sunt cuprinse și materiale granulare fine (Popovici, 2002, CROMB, 2000, Kutzner, 1997).

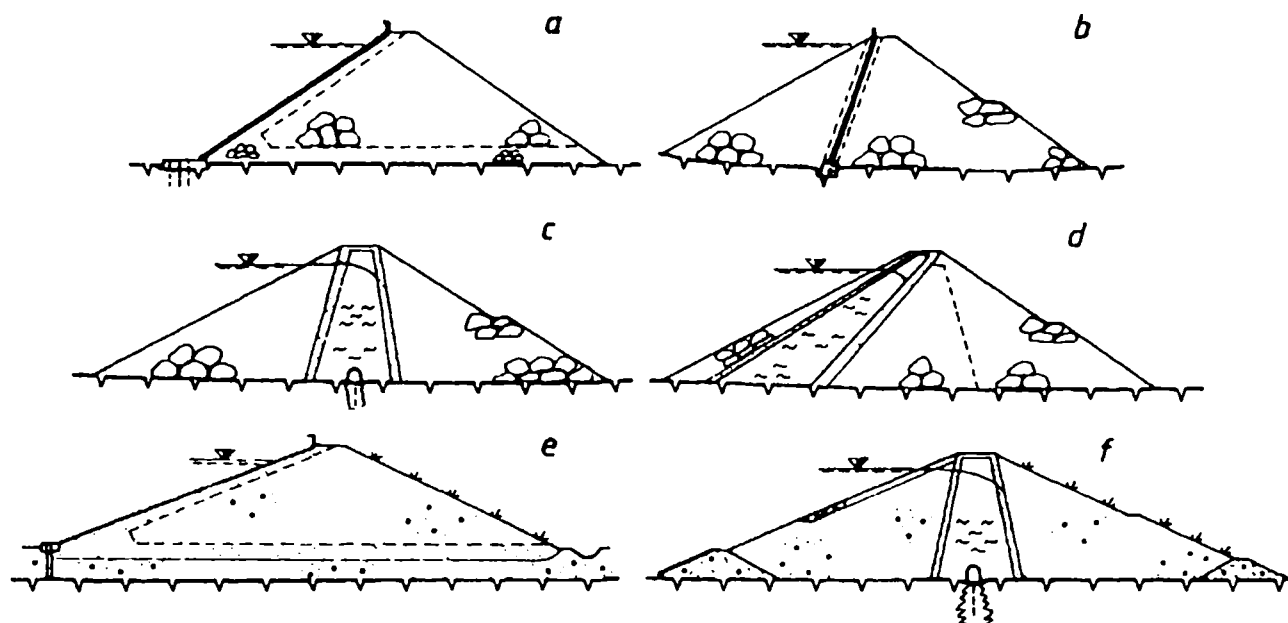


Figura 2.2 Tipuri de baraje din materiale locale

a. de piatră cu mască din materiale nepământoase, b. de piatră cu diafragmă din materiale nepământoase, c. de piatră cu nucleu de pământ, d. de piatră cu mască de pământ, e. de pământ cu mască din materiale nepământoase, f. de pământ cu nucleu de pământ

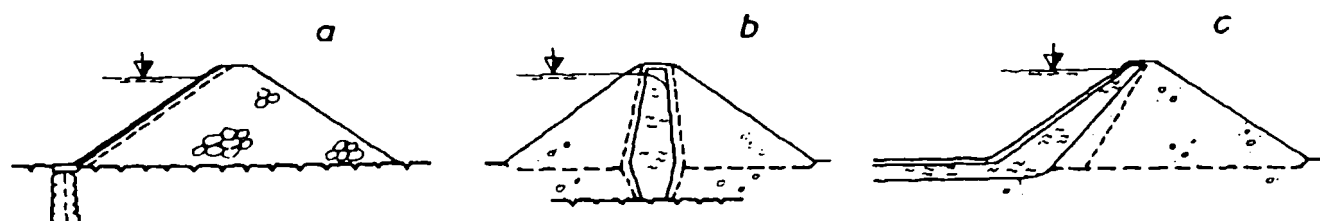


Figura 2.3 Etanșarea terenului de fundare la barajele din materiale locale
a. cu voal, b. cu pinten, c. cu avantradiu

Barajul Esmeralda – Chivor (fig.2.4) din Columbia, prezentând o înălțime de 237 m și o lungime la coronament de 280 m, a fost terminat în anul 1975. În corpul barajului, cu nucleu relativ subțire, sunt înglobate anrocamente și balasturi zonate, pietriș, șisturi argiloase, argilită.

Cel mai înalt baraj din România este Gura Apelor (fig.2.5), realizat din anrocamente cu nucleu de argilă. Barajul are o înălțime de 168 m, respectiv o lungime la coronament de 450 m, și a fost terminat în anul 1990. Nucleul relativ subțire, realizat din material argilos, este încadrat la ambele fețe de straturi de filtre inverse, la baza filtrelor din aval fiind dispusă o galerie specială de drenaj.

Barajul Nurek (fig.2.6) de pe râul Vahș din Tadjikistan, este alcătuit din prisme de rezistență din balast și balast grosier, etanșarea realizându-se cu ajutorul unui nucleu central dintr-o argilă rocoasă. Acest baraj a fost terminat în anul 1980 și, având o înălțime de 308 m și o lungime la coronament de 704 m, este cel mai înalt baraj din lume aflat în exploatare la ora actuală.

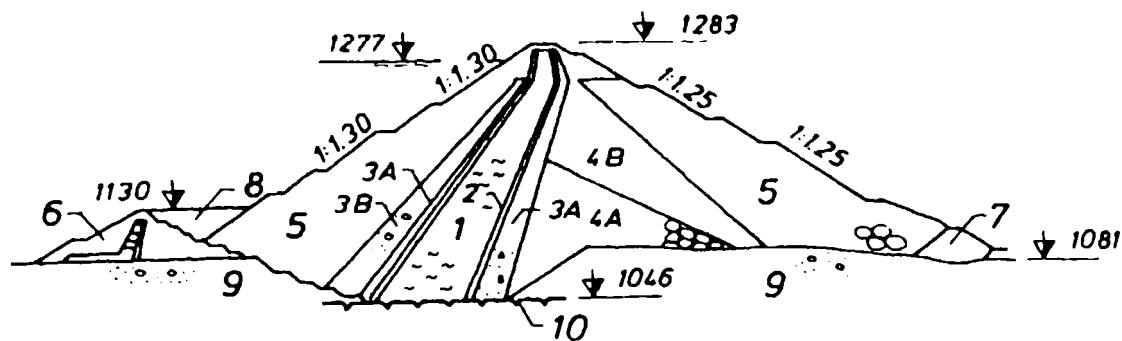


Figura 2.4 Secțiune transversală prin Barajul Esmeralda

1 – nucleu din pietriș în matrice argilo - prăfoasă, 2 – zonă de tranziție din nisip și pietriș, 3A și 3B – filtre inverse din pietriș și nisip, 4 – anrocamente cu dimensiunea maximă de 90 cm, 5 – anrocamente cu dimensiunea maximă de 180 cm, 6 – batardou amonte, 7 – prism de rezistență și batardou aval din blocuri de rocă cu greutatea minimă de 50 kN, 8 – bermă stabilizatoare din umpluturi neselectate, 9 – strat aluvionar, 10 – rocă stâncoasă

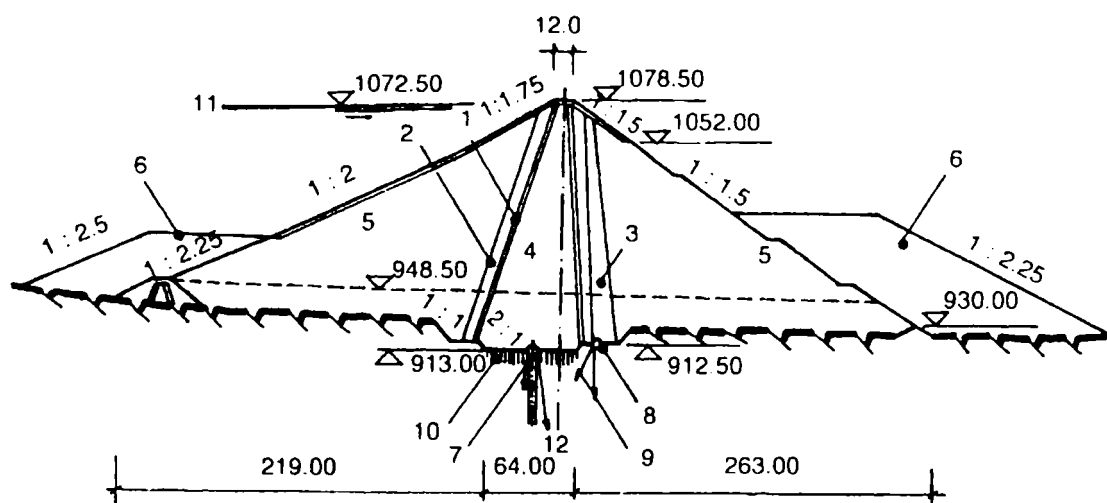


Figura 2.5 Secțiune transversală prin Barajul Gura Apelor

1, 2 – filtre inverse de sorturi diferite, 3 – zonă de balast drenant, 4 – nucleu de argilă, 5 – anrocamente, 6 – prisme de încărcare a versantului stâng, 7 – galerie de vizitare, injecții și drenaj, 8 – galerie de drenaj, 9 – foraje de drenaj, 10 – foraje de consolidare

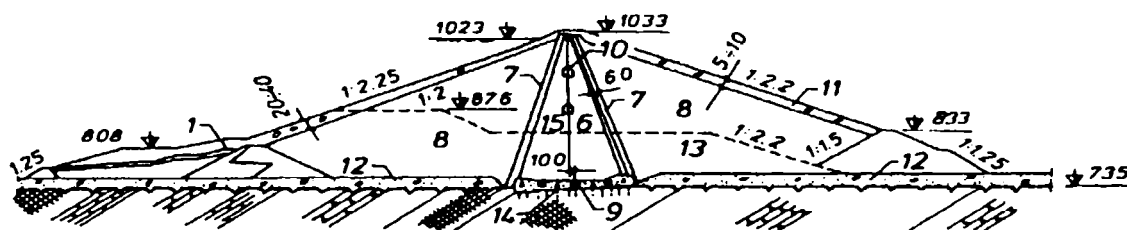


Figura 2.6 Secțiune transversală prin Barajul Nurek

1 – batardouri amonte și aval, 6 – nucleu, 7 – filtre inverse, 8 – prisme din balast, 9 – soclu de beton, 10 – galerii de drenaj, 11 – protecție din anrocamente, 12 – aluviuni naturale, 13 – etapa I de execuție, 14 – injecții de consolidare

Barajul Cerna (fig.2.7), pe râul Cerna, cu o înălțime de 110 m și o lungime la coronament de 342 m, a fost terminat în anul 1980. Barajul

este din umplutură de anrocamente, cu nucleu din argilă ușor înclinat înspre amonte.

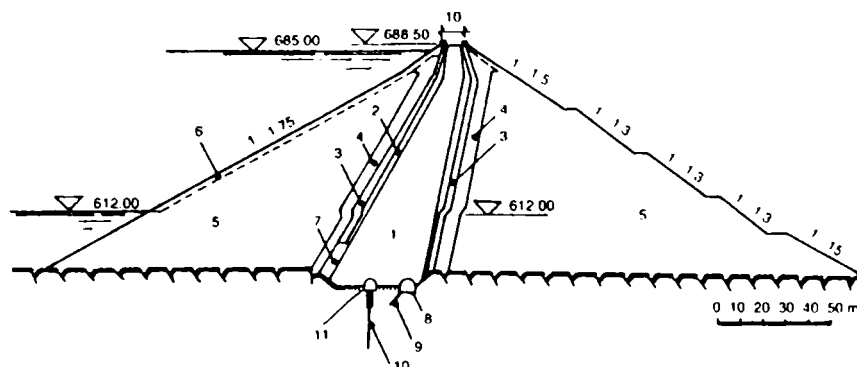


Figura 2.7 Secțiune transversală prin Barajul Cerna

- 1 – nucleu din argilă, 2, 3, 4 – filtru invers din material granular de diferite sorturi,
 5 – umplutură din anrocamente, 6 – protecție amonte, 7 – filtru din balast natural,
 8 – galerie de drenaj și vizitare, 9 – foraj de drenaj, 10 – ecran de injecții,
 11 – injecții de consolidare

Barajul Măneciu de pe râul Teleajen (fig.2.8) a fost terminat în anul 1989, fiind alcătuit din prisme de balast cu nucleu argilos. Barajul are o înălțime de 78 m și o lungime la coronament de 750 m. Paramentul amonte al barajului este protejat cu un strat de anrocamente de 1.5 m grosime. Partea superioară este de asemenea protejată cu anrocamente.

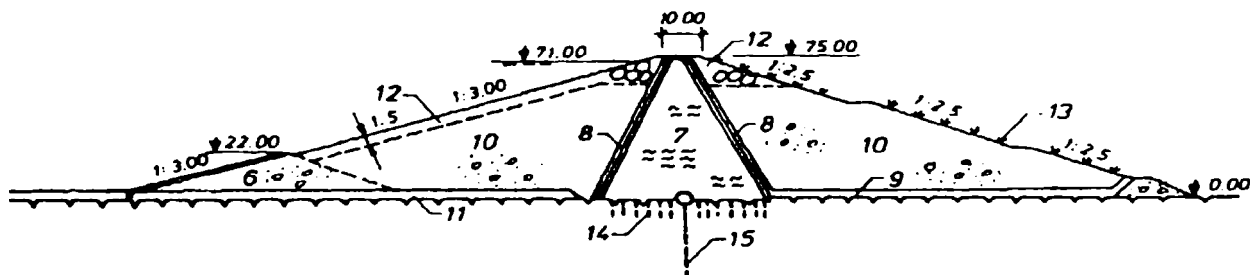


Figura 2.8 Secțiune transversală prin Barajul Măneciu

- 6 – batardou amonte, 7 – nucleu din material argilos, 8 – filtre inverse,
 9 – saltea de drenaj, 10 – prisme din balast, 11 – balast natural,
 12 – protecție din anrocamente, 13 – protecție prin înierbare,
 14 – injecții de consolidare, 15 – voal de etanșare

Enumerarea poate continua cu multe exemple de baraje din materiale locale cu înălțimi mai mici, acest tip de baraj fiind cel mai des adoptat. În afară de construcțiile de barare a cursurilor de apă, materialele locale sunt întotdeauna folosite la construirea digurilor laterale de închidere a cunetei lacurilor de acumulare realizate pe cursurile inferioare ale râurilor. De asemenea, digurile de protecție împotriva inundațiilor de-a lungul cursurilor de apă sunt realizate din materiale locale, de regulă material aluvionar de diverse tipuri. Deși de înălțime relativ mică, importanța acestor construcții este considerabilă ceea ce impune o tehnologie de punere în operă și respectiv de compactare adecvată. În același timp, având în vedere faptul că lungimea acestor construcții este foarte mare, volumul de lucrări reclamă procedee eficiente de execuție.

2.2 Utilizarea materialelor granulare fine în corpul barajelor din materiale locale

Conform celor prezentate prin intermediul figurilor 2.1 și 2.2, corpul barajelor de umplură poate fi omogen sau poate fi alcătuit din câteva elemente generale: prisme de rezistență, elementul de etanșare, filtre (inclusiv elemente de drenaj). Funcția principală a fiecăruia din aceste elemente este îndeplinită pe baza tipului materialelor locale utilizate, respectiv pe baza calităților acestora (Popovici, 2002).

Având în vedere varietatea potențialelor amplasamente ale barajelor din materiale locale, precum și numărul și diversitatea materialelor de construcție posibile, este evident faptul că fiecare construcție de acest tip este o structură unică.

Prisme de rezistență pot fi realizate din materiale de tipul anrocamentelor, obținute din orice categorie de roci, din balast natural de râu. Uneori prisme de rezistență sunt formate din zone distincte de balast și de piatră. La ora actuală dispunerea materialelor în corpul prismelor de rezistență ale barajelor de umplură (chiar și a unor materiale de calitate slabă sau mediocră) este determinată în foarte mare măsură de criterii economice (prețul de cost). Pornind de la proprietățile materialelor impuse, profilul construcției se adaptează în consecință.

Pentru a fi corespunzătoare la realizarea elementelor de etanșare, pământurile trebuie să îndeplinească următoarele condiții de bază: procentul de fracțiune fină, de argilă ($d < 0.005$ mm), trebuie să fie cuprins între 10 și 70 %; coeficientul de permeabilitate trebuie să fie asigurat între $1 \cdot 10^{-5}$ și $5 \cdot 10^{-6}$ m/s; să nu conțină humus, săruri solubile, rădăcini. Aceste materiale pot proveni din cariere de argile nisipoase și prăfoase (inclusiv loessuri), argile, argile cu pietrișuri sau fragmente de roci, grohotișuri și deluvii cu conținut corespunzător de parte fină.

Filtrele inverse, în mod curent necesare în corpul barajelor din materiale locale, sunt alcătuite din unul sau mai multe straturi de nisip – pietriș, având mărimea granulelor crescătoare în sensul de curgere a apei de infiltrație. În funcție de modul în care sunt dispuse în corpul barajelor, filtrele îndeplinesc diferite funcțiuni. În cazul barajelor omogene, filtrele, dispuse sub formă de straturi drenante în zona aval a corpului barajului, au rolul de a coborî curba de infiltrație. În cazul barajelor neomogene cu element de etanșare din materiale pământoase, filtrele încadrează elementul de etanșare și au rolul de a proteja materialul fin al acestuia împotriva antrenării (atât în regim de funcționare staționar, curent, cât și în regim de golire rapidă a acumulării). În cazul umpluturilor pe fundații argiloase, filtrul de contact cu terenul de fundare are rolul de a accelera procesul de consolidare al materialului argilos.

637-059
369C

Având în vedere funcțiunile sale, un filtru invers trebuie să îndeplinească două condiții de bază: condiția de protecție împotriva antrenării particulelor de materialului mai fin în vecinătatea căruia este prevăzut, respectiv condiția de permeabilitate prin care acesta trebuie să primească și să conducă întregul debit drenat (fără creșterea presiunii apei).

Granulometria filtrelor se stabilește în general pe bază experimentală, diversele recomandări din literatura de specialitate nefiind pe deplin convergente. Conform criteriului considerat de U.S. Bureau of Reclamation, dacă se notează cu d diametrul caracteristic al granulelor din stratul mai fin (protejat) și cu D diametrul caracteristic al granulelor filtrului, granulometria acestuia poate fi stabilită orientativ pe baza următoarelor restricții:

- în cazul filtrelor din materiale monogranulare (având un coeficient de

neuniformitate $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3 \dots 4$)

$$5 \leq \frac{D_{50}}{d_{50}} \leq 10 \tag{2.1}$$

- în cazul filtrelor din particule rulate

$$12 \leq \frac{D_{50}}{d_{50}} \leq 58 \text{ și } 12 \leq \frac{D_{15}}{d_{15}} \leq 40 \tag{2.2}$$

- în cazul filtrelor alcătuite din particule colțuroase

$$9 \leq \frac{D_{50}}{d_{50}} \leq 30 \text{ și } 6 \leq \frac{D_{15}}{d_{15}} \leq 18 \tag{2.3}$$

În figura 2.9 este ilustrat un exemplu de alegere a unui filtru invers pe baza criteriului menționat mai sus. Se observă că filtrul trebuie să prezinte o curbă granulometrică cât mai paralelă cu curba granulometrică ce caracterizează materialul mai fin, protejat.

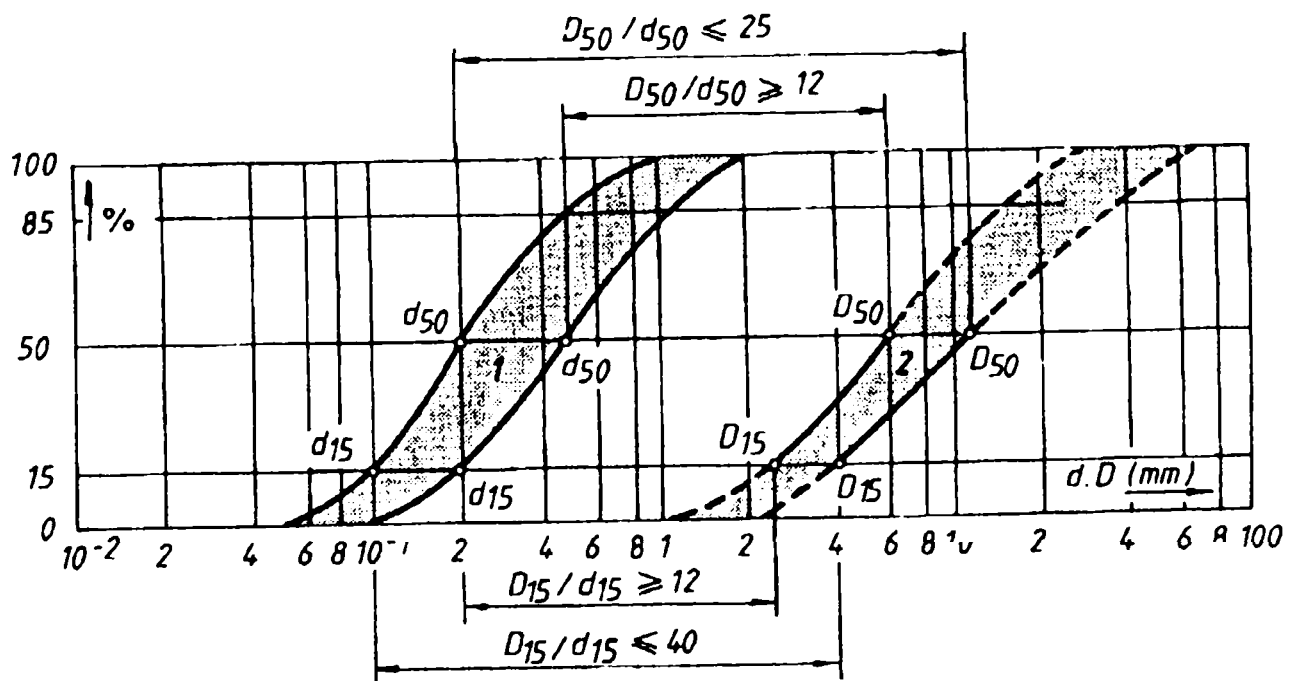


Figura 2.9 Stabilirea curbei granulometrice a unui filtru pe baza criteriului U.S. Bureau of Reclamation

În figura 2.10 se prezintă limitele granulometrice pentru diversele tipuri de materiale ce pot fi folosite pentru elementele componente ale corpului unui baraj din umpluturi.

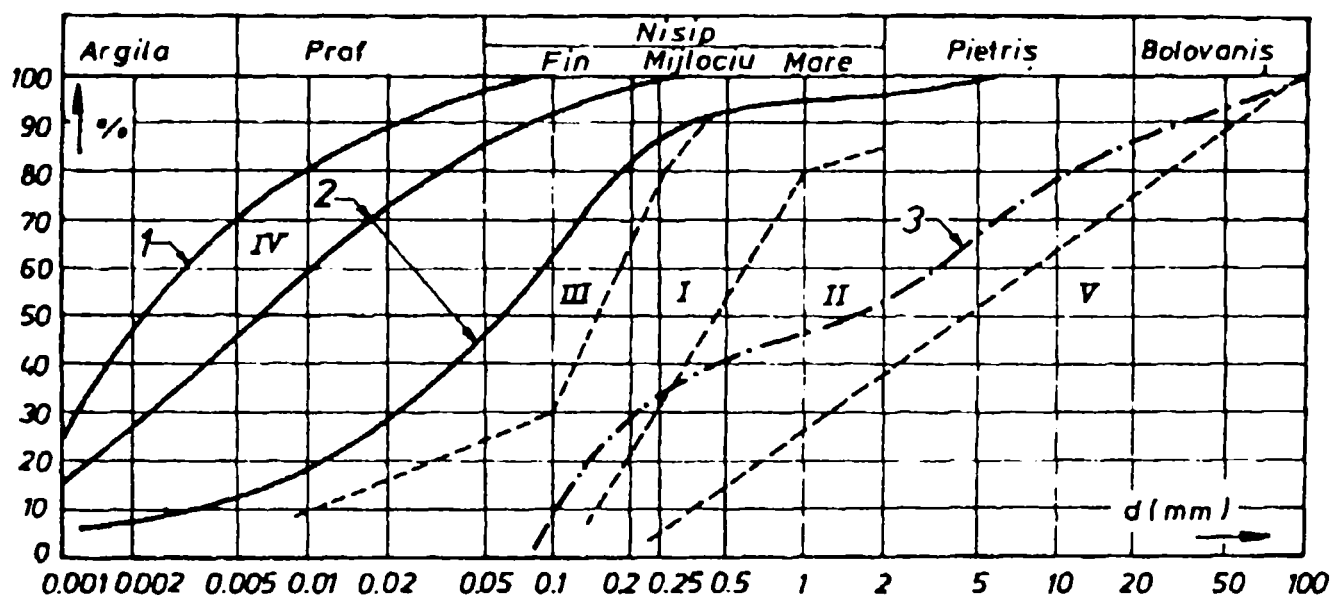


Figura 2.10 Granulometria materialelor ce pot fi folosite în corpul barajelor din umplutură: 1 – argile grase, 2 – prafuluri argilo – nisipoase, 3 – pietrișuri cu nisip, I, II, III, IV, V – delimitarea și gruparea în ordinea calității materialelor potențial disponibile

În capitolul 4 al lucrării de față este prezentată granulometria materialului a considerat pentru studiul aplicativ. Având în vedere că acest material este un nisip fin, se observă că se încadrează în domeniul corespunzător pentru realizarea filtrelor inverse în corpul barajelor din materiale locale neomogene, în imediata vecinătate a unui element de etanșare din argilă. Deasemenea, printr-o compactare corespunzătoare, cu acest material se pot realiza diguri de închidere laterale, diguri de protecție a polderelor, precum și baraje de umplutură omogene de mică înălțime.

În ceea ce privește tehnologia de execuție a construcțiilor din pământ, una dintre cele mai importante faze este compactarea. În cazul materialelor granulare, necoezive, în rândul cărora se încadrează și nisipul menționat mai sus, se remarcă tendința actuală de generalizare a procedurii de compactare cilindri netezi vibratorii (Popovici, 2002, Kutzner, 1997).

Capitolul 3

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

Acest capitol cuprinde o prezentare generală întocmită pe baza informațiilor relevante obținute prin cercetarea literaturii de specialitate, referitor la compactarea materialelor granulare cu ajutorul cilindrului vibrator neted. Informațiile selectate din materialul studiat încearcă să ofere un fundament util în subiectul concret al influenței conținutului de apă asupra caracteristicilor dinamice ale materialelor granulare și, în consecință, asupra rezultatelor obținute prin sistemul controlului continuu al compactării.

Primul paragraf prezintă cunoștințele de bază necesare pentru o înțelegere corectă a procesului compactării solurilor, cu un accent deosebit asupra principiului comportării materialelor granulare supuse încărcărilor dinamice. Deasemenea este prezentat principiul de lucru al cilindrului vibrator neted, împreună cu modelul matematic general considerat pentru a descrie acest sistem de compactare. Fenomenul de bază implicat în această compactare dinamică este studiat cu ajutorul unui model dezvoltat în laborator. Pentru a obține forța de interacțiune dintre cilindrul compactor și materialul granular compactat, este considerat un model al solului necoeziv încărcat dinamic vertical.

Paragraful următor descrie principiul de bază al sistemului controlului continuu al compactării și prezintă tipurile de informații obținute cu ajutorul principalelor dispozitive CCC produse în lume.

Efectul conținutului de apă asupra rezultatelor compactării prin mijloace dinamice a materialelor granulare puse în operă este prezentat în cel de-al trei-lea paragraf. În afară de unele considerații privitoare la comportarea materialelor granulare în timpul compactării, în acest paragraf sunt deasemenea prezentate câteva rezultate ale unor teste de compactare efectuate cu cilindrii vibratorii.

În cel de-al patru-lea paragraf sunt definite caracteristicile dinamice ale solurilor și sunt prezentați principalii parametri care influențează mărimea acestora. Deasemenea sunt prezentate trei modele empirice dezvoltate pentru estimarea modulului de rezistență la tăiere pe baza diversilor parametri care intervin (e.g. presiune, porozitate, densitate relativă, gradul de saturare, caracteristicile granulelor).

Informațiile obținute pe baza studiului literaturii de specialitate arată interesul arătat atât de către practicieni cât și de cercetători față de sistemul CCC. Totuși, cu toate că principiul sistemului este stabilit clar, unele aspecte cum ar fi relația dintre conținutul de apă și datele oferite de dispozitivul CCC nu au fost încă studiate direct.

3.1 Compactarea materialelor granulare fine cu ajutorul cilindrului vibrator neted

3.1.1 Noțiuni generale ale compactării dinamice

Termenul de compactare se referă la procesul artificial prin care greutatea specifică a solului este mărită prin constrângerea granulelor să se rearanjeze într-o stare mai densă. În timpul compactării aerul conținut în sol este expulzat, în general prin procedee mecanice. Apa conținută în sol poate fi deasemenea expulzată, în special în cazul materialelor granulare permeabile, prin compactare fiind redusă porozitatea. În acest fel, prin reducerea porilor unui material de umplură posibilitatea modificării semnificative a conținutului de apă se reduce, iar tasările ulterioare devin neglijabile.

În literatura de specialitate (Johnson și Sallberg, 1960) se arată că procesul compactării este influențat de o serie de factori printre care cei mai semnificativi sunt natura solului, conținutul de apă și natura efortului de compactare. Influența efortului de compactare constă în natura echipamentului de compactare și modul de utilizare al acestuia. Din acest punct de vedere, pentru a obține cu un anumit utilaj gradul de compactare dorit, sunt importante lățimea și adâncimea stratului compactat, viteza de parcurgere și numărul trecerilor necesare.

Fenomenul compactării se consireră în funcție de proporția volumelor sau maselor dintre conținutul de aer, conținutul de apă și partea solidă a solului. În mod cantitativ, gradul de compactare este măsurat în termeni de densitate a solului în stare uscată, ceea ce reprezintă masa părții solide din unitatea de volum a materialului compactat. În figura 3.1 sunt prezentate sub forma unei diagrame fazele solidă, lichidă și de aer a unui material compactat. În anexa A sunt prezentate definițiile diversilor termeni considerați în fenomenul compactării, precum și relațiile de legătură dintre aceștia.

O parte importantă a tasărilor produse sub diversele structuri au loc datorită compactării cauzate de vibrații. Efectul tensiunii de suprafață la contactul dintre granulele unui material umed reprezintă rezistența la alunecarea acestora în timpul procesului de rearanjare într-o poziție mai densă. Având în vedere acest lucru, materialele granulare uscate prezintă o compactare mai pronunțată sub acțiunea vibrațiilor decât materialele caracterizate prin coeziune aparentă (Das, B.M., 1983).

Pentru a evalua efectul unei încărcări dinamice asupra unui material granular sub presiune, diverse studii de laborator au fost efectuate în două moduri (D'Appolonia, E., 1967, 1970): prin aplicarea unei presiuni

verticale ciclice controlate, respectiv prin aplicarea unei accelerații verticale ciclice controlate (figura 3.2).

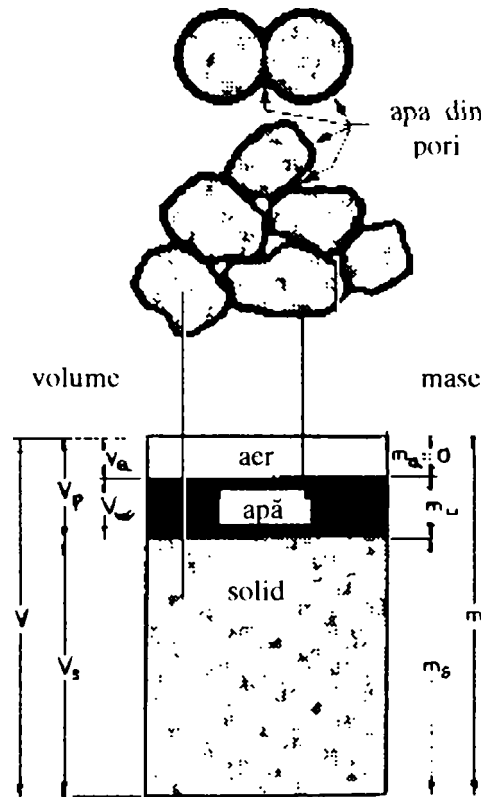


Figura 3.1 Compoziția solului

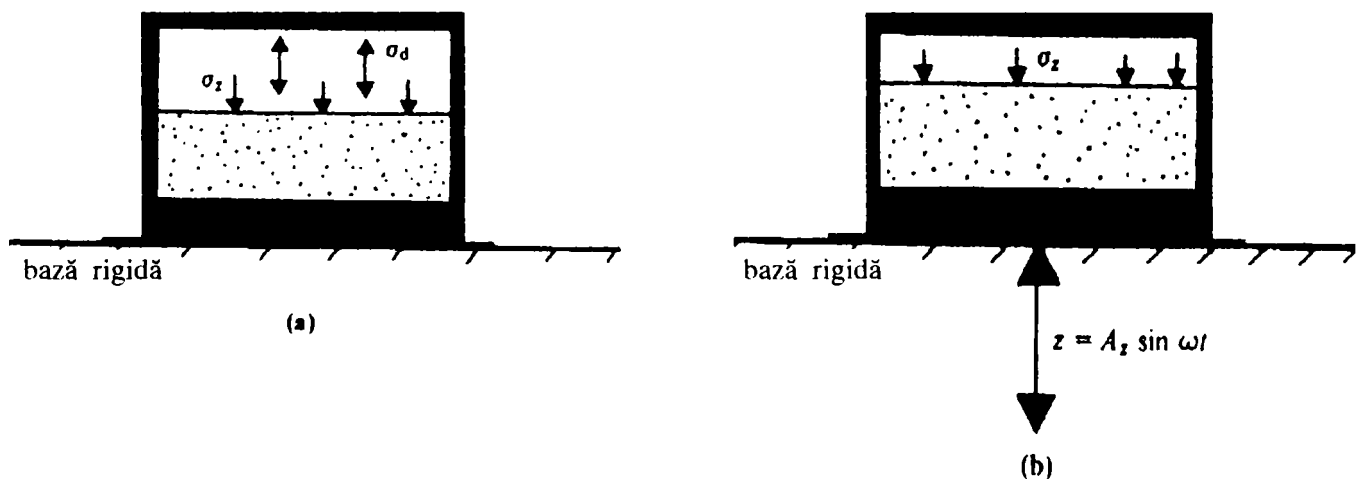


Figura 3.2 Compactarea dinamică a unui material granular prin aplicarea
 (a) unei presiuni verticale ciclice, respectiv
 (b) a unei accelerații verticale ciclice.

În primul caz, asupra materialului granular din incintă este aplicată o presiune verticală a aerului σ_z , iar apoi este aplicată în câteva cicluri o presiune dinamică de amplitudine σ_d . În cel de al doi-lea caz, după aplicarea presiunii verticale σ_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 deci

controlată prin intermediul amplitudinii deplasării și a frecvenței de vibrație.

Compresiunea verticală a specimenului este măsurată la sfârșitul fiecărui test. În figura 3.3 sunt prezentate rezultatele unor teste de compresiune realizate prin intermediul unei accelerații ciclice verticale aplicate unui nisip uscat (Ortigosa și Whitman, 1968). 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 (1x 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.

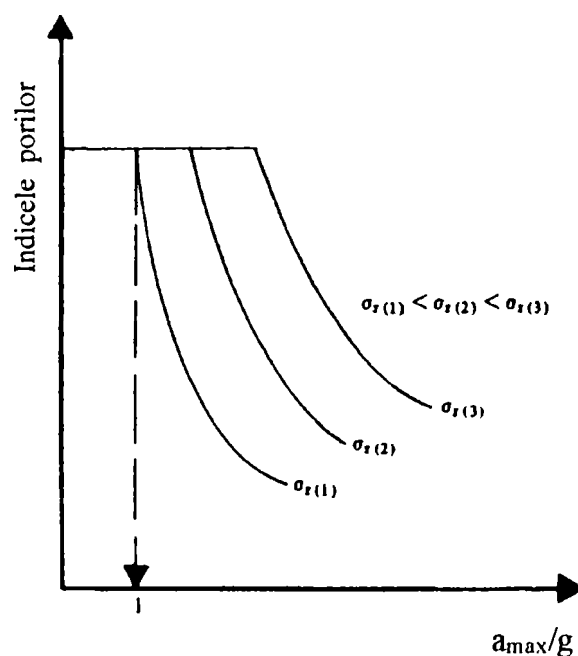


Figura 3.3 Variația porozității unui nisip uscat pe parcursul testelor de compresiune cu accelerație ciclică verticală

În figura 3.4 este prezentată variația greutatei specifice nete în raport cu perioada de vibrație atât pentru un nisip uscat cât și pentru un nisip umed (4.5 % conținut de apă), ambele supuse unei accelerații ciclice verticale (Krizek și Fernandez, 1971). În urma studiilor desfășurate, autorii au ajuns la următoarele concluzii principale: pentru vârfuri 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 greutatei specifice finale nete. Din figura considerată se poate de asemenea observa că, în comparație cu nisipurile uscate, nisipurile umede prezintă o plajă mai largă de distribuție a greutatei specifice nete finale. Aceasta înseamnă că în cazul compactării nisipurilor umede, pe lângă magnitudinea accelerației ciclice există și alți parametri cu o influență importantă asupra fenomenului.

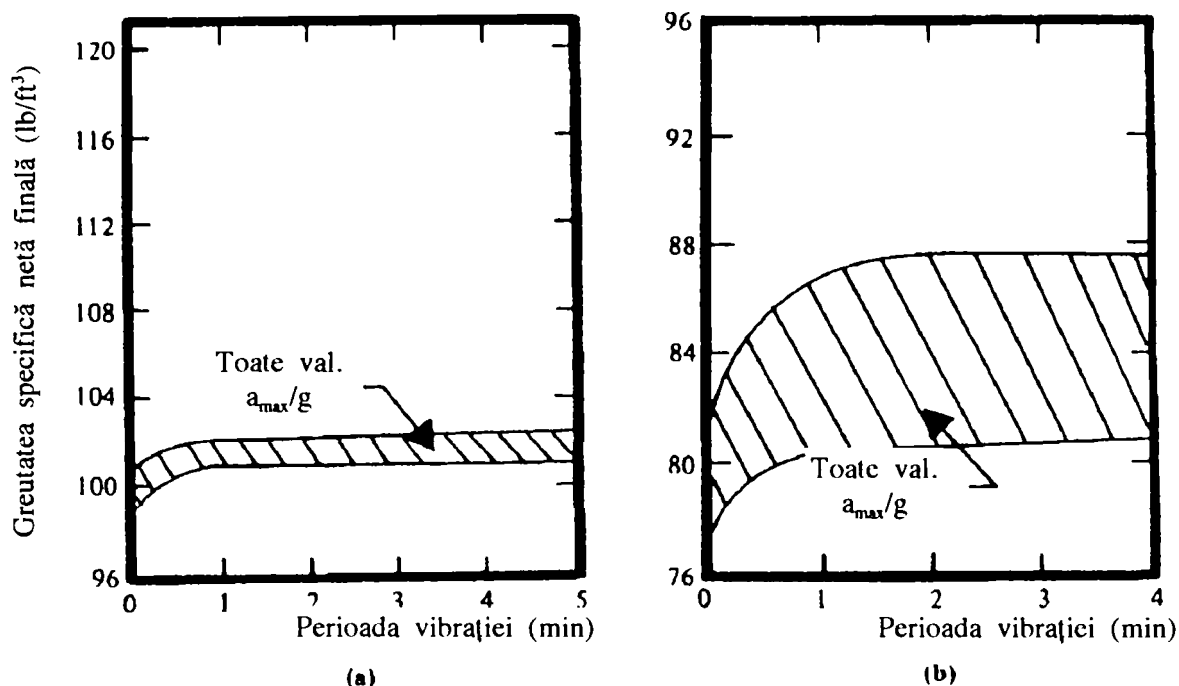


Figura 3.4 Influența perioadei de vibrație în cazul compactării dinamice
(a) a nisipurilor uscate și (b) a nisipurilor umede

Efectul vibrațiilor în fenomenul compactării materialelor granulare se poate că se manifestă ca urmare a patru mecanisme posibile (Selig și Yoo, 1977): vibrația granulelor, impact, reducerea eforturilor, dezvoltarea deformațiilor specifice ciclice.

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

Impactul este determinat de faptul că utilajul compactor întrerupe contactul cu suprafața solului la fiecare ciclu al vibrației. Testele in situ au arătat că în mod curent această situație apare în cazul acțiunii cilindrului vibrator asupra unui material deja compactat.

În ceea ce privește eforturile în materialul compactat este posibil ca acestea să fie reduse datorită aplicării vibrațiilor în anumite condiții și astfel să determine o compactare mai ușoară. Această situație se pare că are loc numai în cazul materialelor necoezive întrucât cercetările in situ au arătat că materialele coezive devin în general mai tari în timpul aplicării unor încărcări dinamice.

Cel de-al patru-lea mecanism menționat mai sus, dezvoltarea deformațiilor specifice ciclice datorită oscilațiilor cilindrului vibrator, este considerat ca fiind cel care furnizează cea mai bună explicație a compactării produse cu acest utilaj. Testele au demonstrat că acest mecanism este prezent în compactarea dinamică a tuturor mostrelor de materiale granulare, atât coezive cât și necoezive.

3.1.2 Prezentarea generală a cilindrilor vibrator

Vibrațiile sunt foarte des utilizate în practică ca mijloc de compactare a solurilor. Dintre diversele metode dinamice, compactarea prin intermediul cilindrului vibrator netezi este una dintre cele mai utilizate în special în cazul materialelor granulare.

Cilindrii vibratorii îmbunătățesc performanța utilajelor cu acțiune statică prin suprapunerea forței dinamice. În timpul compactării dinamice este utilizată o combinație a încărcărilor statice cu cele dinamice. Cilindrul excitat dinamic aplică suprafeței solului o succesiune rapidă de impacturi, iar în continuare în material sunt transmise unde tăietoare și de compresiune care pun granulele în mișcare. În acest fel, frecarea dintre granule este redusă periodic ceea ce, în combinație cu încărcarea statică, determină rearanjarea acestora într-o poziție cu o porozitate redusă și deci cu o densitate mai mare.

În funcție de proprietățile materialului (granulometrie, forma granulelor, conținutul de apă, permeabilitate) și grosimea stratului ce urmează a fi compactat, cilindrul vibrator este selectat pe baza principalilor parametrii care contribuie la acest proces: greutatea totală a utilajului, încărcarea statică a cilindrului, caracteristicile dinamice ale cilindrului (forța dinamică rezultantă, frecvența de excitație, amplitudinea mișcării), diametrul cilindrului.

Mecanismele vibratoare care echipează utilajele compactoare, sunt în general alcătuite din două greutateți excentrice rotative fixate pe, sau excentric la, axul cilindrului. În funcție de natura excitației produse de către mecanismul vibrator, utilajele de compactare cu cilindrul netezi se pot clasifica în (Adam și Kopf, 2000): cilindri vibratorii, cilindri oscilatori, cilindri acționați variabil, cilindri cu bile de oțel și cilindri cu greutateți excentrice exterioare.

Cilindrul vibrator, cel mai frecvent utilizat, este excitat fie prin intermediul unei greutateți excentrice rotative fixate de ax (fig.3.5.a), fie prin intermediul a două greutateți excentrice rotative fixate simetric față de ax (fig.3.5.b). În primul caz greutatea excentrică imprimă cilindrului o mișcare circulară, direcția forței rezultante corespunzând cu poziția greutateții. În cel de-al doilea caz, cele două greutateți imprimă cilindrului o mișcare oscilatorie verticală. În ambele cazuri forța de compactare rezultantă este considerată aproximativ verticală, compactarea fiind obținută în principal datorită combinației dintre undele de compresiune și încărcarea statică.

În cazul *cilindrului oscilator*, cele două greutateți excentrice sunt defazate (fig.3.5.c), imprimând cilindrului o oscilație torsională. În acest fel, pe lângă încărcarea statică terenul este încărcat și dinamic orizontal. Forțele dinamice orizontale determină în sol deformații tăietoare, compactarea fiind realizată în principal prin transmiterea undelor tăietoare. Vibrația

cilindrului este controlată prin modificarea direcției de rotație și a defazajului celor două mase excentrice. Întrucât vibrațiile induse sunt în mod semnificativ mai mici decât în cazul cilindrilor vibrator, cilindri oscilatori se utilizează în special în vecinătatea unor structuri sensibile.

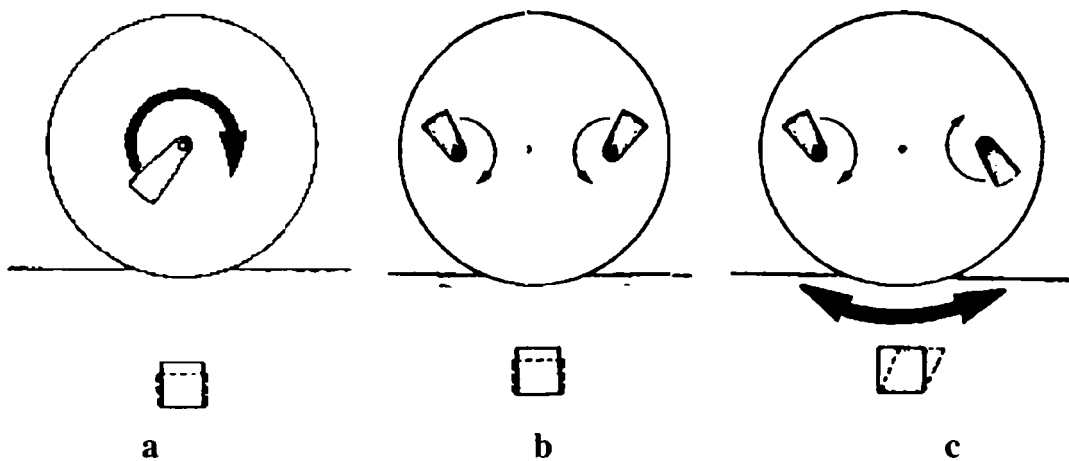


Figura 3.5 Excitarea cilindrilor vibratori (a, b) și a cilindrilor oscilatori (c)

În cazul *cilindrilor acționați variabil* vibrațiile sunt cauzate de câte două greutatea excentrice fixate concentric în axul cilindrului, dar care se rotesc în sensuri contrare una alteia (fig.3.6). Pentru a optimiza efectul de compactare asupra unui anumit tip de material, direcția de excitare poate fi ajustată prin reorientarea mecanismului vibrator. Astfel, acest utilaj se poate utiliza ca și compactor dinamic fie prin compresiune (fig.3.6.a, tip cilindru vibrator), fie prin deformații tăietoare (fig.3.6.c, tip cilindru oscilant), fie ca o combinație a celor două direcții de acțiune (fig.3.6.b). Direcția de excitare este corectată automat (fig.3.7), pe baza unor criterii de control care permit optimizarea procesului de compactare. Se obțin astfel avantaje importante în procesul de compactare: un grad ridicat de uniformitate al lucrării în condițiile unui număr redus de treceri, prevenirea supra-compactării sau a relaxării, reducerea vibrațiilor în vecinătatea altor structuri sensibile.

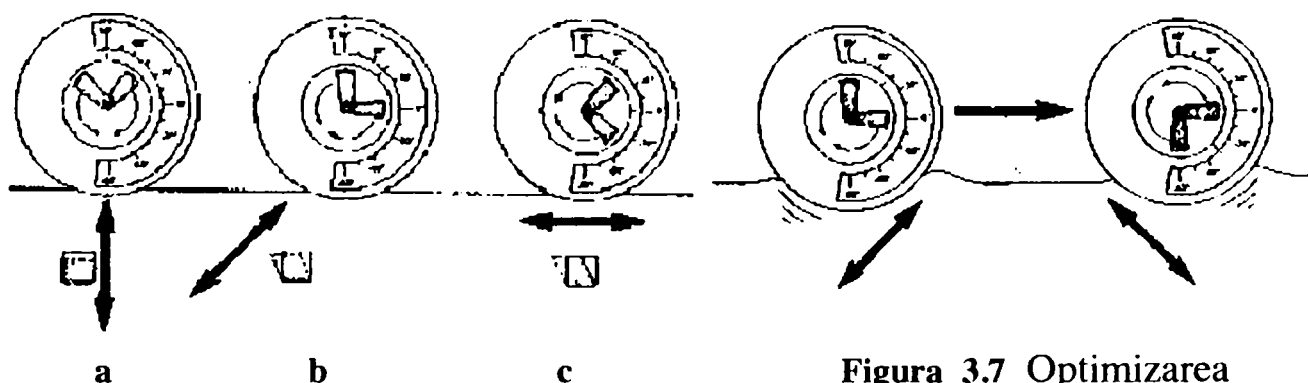


Figura 3.6 Ajustarea direcției de excitare

Figura 3.7 Optimizarea compactării

Efectul vibrator poate fi deasemenea obținut cu ajutorul unor *bile de oțel* acționate circular în interiorul cilindrului sau prin utilizarea unor *greutăți excentrice exterioare*, fixate pe cadrul care susține cilindrul.

3.1.3 Modelul matematic al cilindrului vibrator

Un cilindru vibrator este în general descris ca un sistem cu două grade de libertate cinematică (fig.3.8) pentru care în general se consideră numai componenta verticală a forței dinamice (Yoo și Selig, 1979). Mișcarea este descrisă prin deplasările cilindrului compactor și a cadrului care îl susține, z_d și z_f .

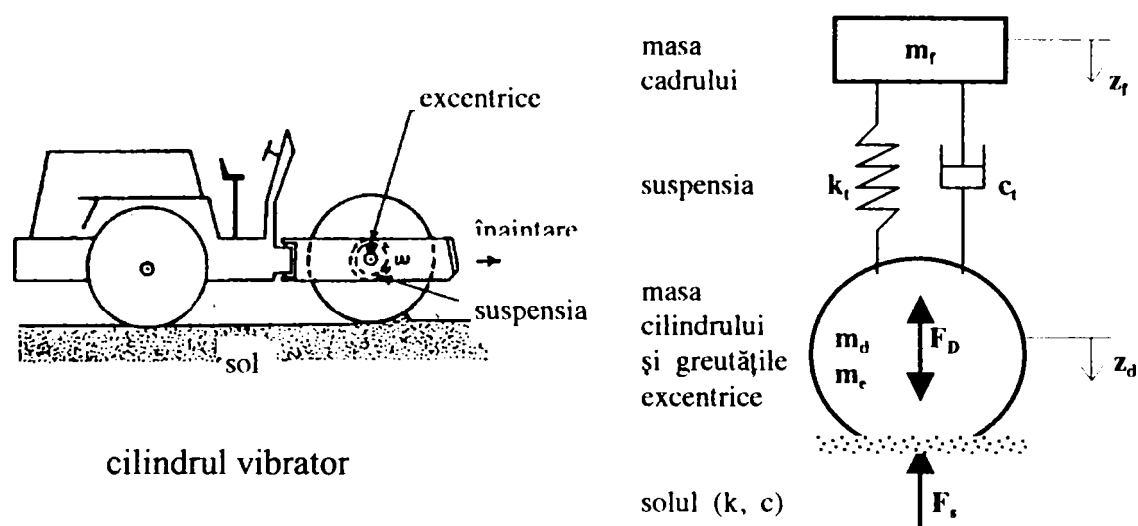


Figura 3.8 Modelul matematic al sistemului sol – compactor

Caracteristicile principale ale modelului sol – compactor sunt:
 masa cilindrului m_d și a greutateilor excentrice m_e ;
 masa cadrului care susține cilindrul m_f ;
 frecvența de operare f și excentricitatea e , a mecanismului vibrator;
 coeficienții de elasticitate k_f și vâscozitate c_f ai sistemului de suspensie;
 coeficienții de elasticitate k și vâscozitate c ai materialului compactat.
 Forța dinamică produsă de mecanismul vibrator este:

$$F_D = F_0 \cdot \sin \omega t = m_e \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (3.1)$$

în care $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ este frecvența unghiulară iar F_0 este forța centrifugă a greutateilor excentrice.

Forța de contact F_S dintre cilindru și sol este o funcție de coeficienții de elasticitate și vâscozitate ai solului, și de deplasările elastice și plastice ale acestuia. Randamentul compactorului este dat de raportul dintre forța de contact (transmisă în sol) și forța generată dinamic: $R_T = F_S/F_D$.

Cele două ecuații diferențiale care descriu mișcarea sistemului cu două grade de libertate, sunt:

pentru cilindru $(m_d + m_e)\ddot{z}_d + c_f(\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_f(z_d - z_f) = m_e e \omega^2 \sin \omega t - F_S \quad (3.2)$

pentru cadru $m_f \ddot{z}_f - c_f(\dot{z}_d - \dot{z}_f) - k_f(z_d - z_f) = 0 \quad (3.3)$

Considerând sistemul ca fiind liber și fără vâscozitate, iar că solul se deformează perfect elastic (adică forța de contact este $F_S = kz_d$), cele două ecuații diferențiale devin:

$$m_r \ddot{z}_d + (k_t + k)z_d - k_t z_f = 0 \quad (3.2')$$

$$m_f \ddot{z}_f + k_t z_f - k_t z_d = 0 \quad (3.3')$$

unde $m_r = m_d + m_e$ este masa totală a cilindrului.

Întrucât soluțiile pentru deplasările cilindrului și cadrului pot fi considerate armonice, ecuația frecvențelor a sistemului liber și fără vâscozitate se obține:

$$\omega^4 - \left(\frac{k_t}{m_f} + \frac{k_t + k}{m_r} \right) \omega^2 + \frac{k_t k}{m_r m_f} = 0 \quad (3.4)$$

iar soluțiile pozitive ale acesteia, reprezentând frecvențele naturale de vibrație ale corpurilor care alcătuiesc sistemul se obțin:

$$\omega_{n,1,2} = \left[\frac{m_r k_t + m_f (k_t + k) \pm \sqrt{(m_r k_t + m_f k_t + m_f k)^2 - 4 m_r m_f k_t k}}{2 m_r m_f} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

În cazul în care sistemul de suspensie (de cuplare a cilindrului în cadrul de susținere) este proiectat și realizat astfel încât cei doi parametri k_t și c_t devin foarte mici, contribuția lor în modelul matematic poate fi neglijată (Adam și Kopf, 2000). Ecuația diferențială care guvernează mișcarea sistemului obținut astfel cu un grad de libertate va fi:

$$m_r \ddot{z}_d = m_e e \omega^2 \sin \omega t - F_s \quad (3.2')$$

unde m_r reprezintă în acest caz masa totală a cilindrului $m_d + m_e + m_f$.

Ecuația frecvențelor în acest caz devine:

$$\omega^2 - \frac{k}{m_r} = 0 \quad (3.4')$$

iar soluția pozitivă a acesteia, frecvența naturală de vibrație a sistemului, este:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_r}} \quad (3.5')$$

Comportarea generală a sistemului dinamic, obținută matematic prin teoria vibrațiilor (Selig și Yoo, 1977), este prezentată în figura 3.9.a, iar efectele diversilor parametri asupra deplasării verticale a cilindrului în condițiile unei frecvențe de vibrație constante sunt prezentate în figura 3.9.b. Aceste rezultate arată că, pe lângă ceilalți parametri, coeficientul de elasticitate al solului are un efect important asupra răspunsului sistemului dinamic. O creștere a rigidității solului determină o creștere a frecvenței naturale a cilindrului și, în consecință, a deplasării și a forței transmise.

Testele de compactare experimentale efectuate la scară naturală cu cilindri vibratorii pentru diverse condiții ale materialului depus au confirmat tendințele preconizate analitic (Selig și Yoo, 1977). Aceasta arată că modelul matematic considerat reflectă corespunzător procesul de

compactare, chiar dacă acesta presupune o comportare ne-lineară și ne-elastică.

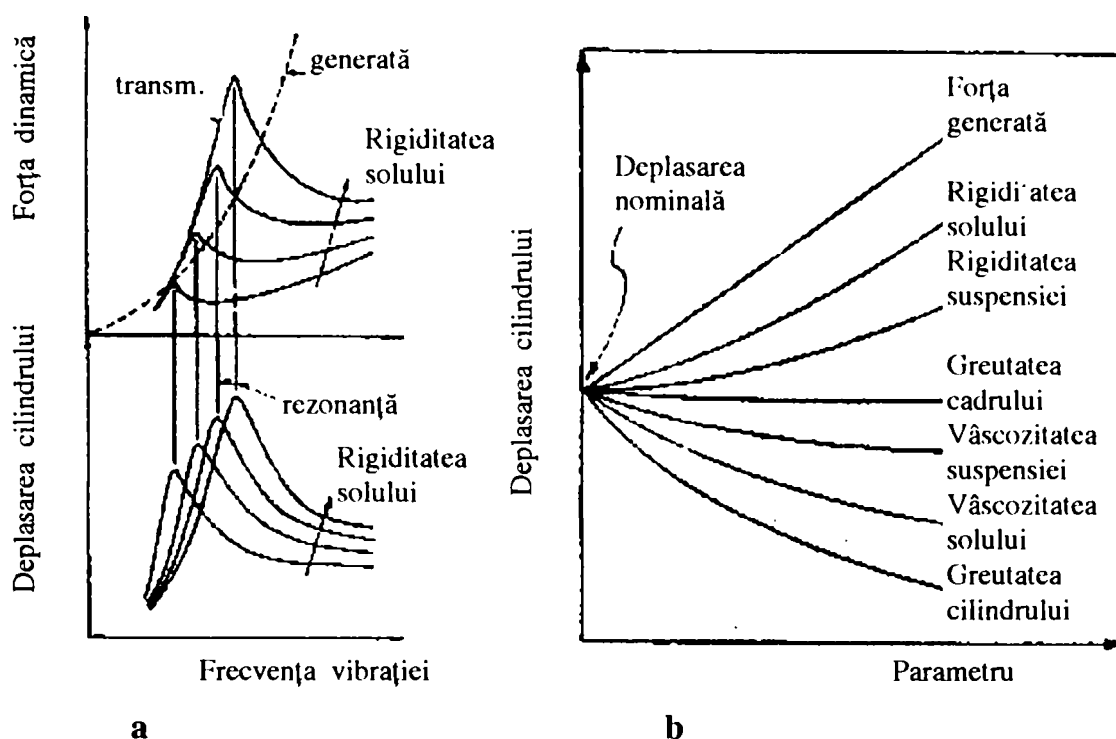


Figura 3.9 Comportarea generală a sistemului sol – cilindru vibrator

Numeroase teste în teren și simulări pe computer au arătat că cilindrul vibrator operează în condiții diferite (tabelul 3.1), ceea ce influențează datele compactării dinamice. Condițiile de operare sunt în general determinate de rigiditatea solului, dar pentru un nivel dat al acesteia, parametrii utilajului au contribuția lor.

Tabelul 3.1 Condițiile de operare ale cilindrului vibrator

Tipul mișcării	Interacțiunea cilindru - sol	Numărul de cicluri	Condiția de operare	Rigiditatea solului
periodică	contact	1	CONTACT CONTINUU	scăzută ↓ ridicată
	pierderea parțială a contactului	1	DESPRINDERE PARȚIALĂ	
		2 (4)	DUBLU SALT MIȘCARE NEREGULATĂ	
haotică		---	MIȘCARE HAOTICĂ	

Cele mai frecvente condiții de operare sunt desprinderea parțială și dublul salt, diferența dintre cele două constând în numărul ciclurilor de excitație la care mișcarea cilindrului se repetă. Contactul continuu are loc doar în cazul materialelor cu rigiditate foarte scăzută. Condiția de operare de dublu salt are loc atunci când excitația cilindrului este prea puternică pentru materialul compactat. Cilindrul lovește suprafața terenului, este aruncat înapoi în sus și parcurge în aer un ciclu de excitație complet înainte de a lovi din nou suprafața terenului. Rezultatul este că impactul asupra terenului este mai puternic dar va avea loc cu o frecvență de două ori mai mică față de o frecvență normală, ceea ce înseamnă că distanța

dintre două puncte de impact consecutive va fi dublă față de normal. Atunci când rigiditatea solului este ridicată, mișcarea cilindrului nu mai este verticală, ci devine neregulată. Din acest moment utilajul nu mai este manevrabil, iar procesul compactării dinamice nu mai poate furniza rezultate suficiente. O valoare foarte ridicată a rigidității solului și parametrii dezavantajoși ai utilajului cauzează o mișcare haotică a cilindrului.

3.1.4 Observații de laborator asupra compactării cu cilindrul vibrator

Pentru a studia fenomenele de bază care intervin în procesul compactării cu cilindrul vibrator, au fost efectuate teste de laborator utilizând dispozitivul prezentat schematic în figura 3.10 (Selig și Yoo, 1980).

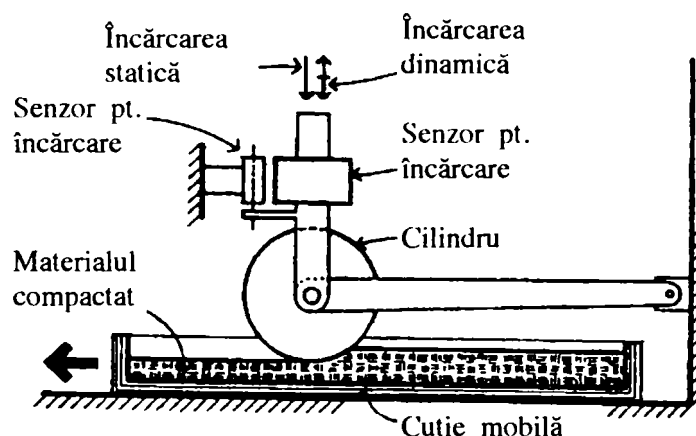


Figura 3.10 Dispozitiv pentru testarea în laborator a compactării cu cilindrul vibrator

Cilindrul vibrator a fost modelat la o scară de 1/5 față de o situație reală. Mișcarea verticală a cilindrului a fost controlată de un piston hidraulic care poate aplica o forță statică dată și o încărcare dinamică de magnitudinea și frecvența dorită. Atât forța cât și deplasarea verticală au fost monitorizate și înregistrate. Pentru a evita efectul vibrațiilor asupra rezistenței granulelor materialului de compactat, și deci pentru a studia numai compactarea determinată de încărcările statică și dinamică, au fost aplicate valori relativ joase ale frecvenței de oscilație (între 0,5 și 3 Hz). Materialul de compactat a fost depus într-o cutie mobilă plasată sub cilindru și trasă cu o viteză constantă dată de condiția ca valoarea raportului frecvență/viteză să corespundă situației în mărime naturală.

Densitatea materialului a fost determinată atât înainte cât și după efectuarea testelor de compactare.

Efectul vibrațiilor cilindrului în procesul de compactare este ilustrat în figura 3.11 printr-un grafic tipic al înregistrării forței verticale și a deformației de compresiune (Selig și Yoo, 1982). În prima fază, cilindrul este ținut suspendat astfel încât doar atinge suprafața materialului de compactat, iar în consecință forța aplicată și compresiunea sunt zero. În continuare, cilindrul este încărcat astfel încât să exercite asupra materialului forța statică de contact dorită, iar cutia este trasă cu viteza

constantă impusă. Compactarea corespunzătoare acestei faze este indicată de poziția B. În final, pentru a simula vibrațiile produse de un cilindru vibrator, forței statice i se suprapune o forță oscilatorie. Chiar dacă forța medie de contact aplicată materialului este egală cu forța statică, o compactare sporită se observă în poziția C.

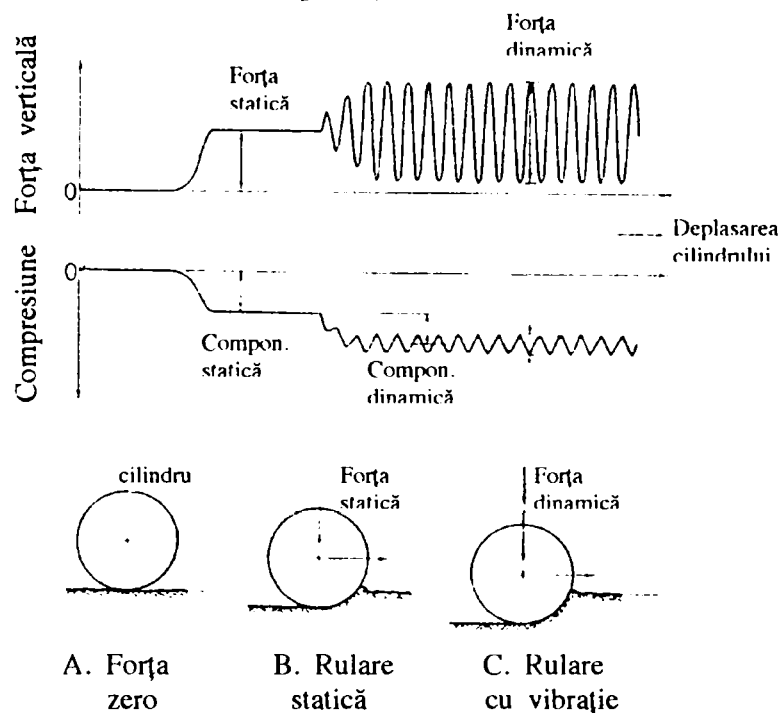


Figura 3.11 Rezultatul tipic al testelor cu dispozitivul la scară

Relația curentă dintre forță și compresiunea realizată obținută cu ajutorul dispozitivului la scară al unui cilindru vibrator, este prezentată în figura 3.12. Curba P-Q corespunde încărcării staționare, iar segmentul Q-R reprezintă compresiunea materialului în timpul rulării statice (fără vibrație). În continuare curba corespunde comportării sub acțiunea dinamică. După câteva cicluri se dezvoltă o buclă închisă a curbei forță - compresiune, care va rămâne în continuare identică pentru fiecare ciclu.

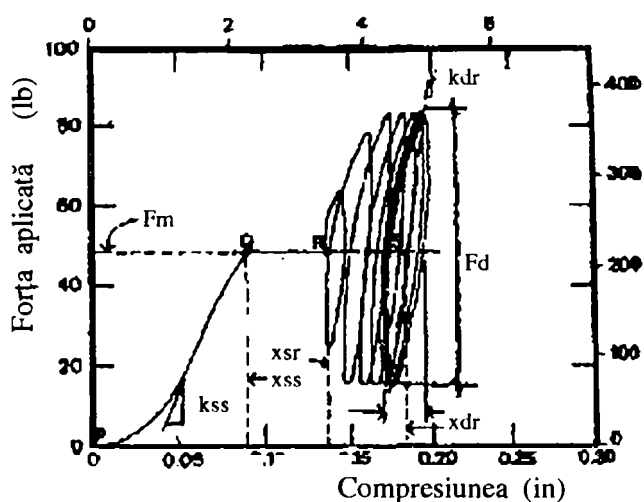


Figura 3.12 Relația curentă forță - compresiune pe parcursul unei treceri a cilindrului

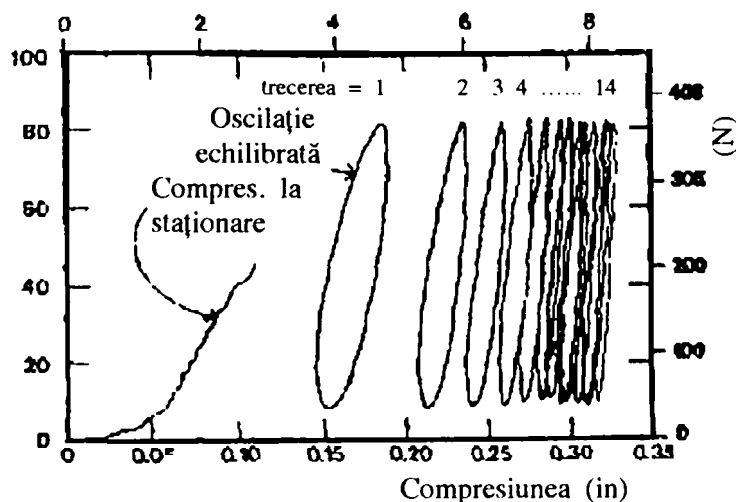


Figura 3.13 Relația curentă forță - compresiune corespunzătoare pentru n treceri a cilindrului

În figura dată, x_{ss} reprezintă compresiunea înregistrată în timpul staționării cilindrului, x_{sr} este compresiunea datorată acțiunii de rulare statică, iar x_{dr} este compresiunea medie datorată acțiunii de rulare dinamică. Rigiditatea materialului comprimat, resimțită de cilindru, este reprezentată prin k_{ss} , pentru faza staționării cilindrului, și k_{dr} , corespunzător fazei de rulare dinamică. Aria cuprinsă într-o buclă închisă reprezintă energia consumată pe parcursul unui ciclu. Pe parcursul trecerilor succesive ale cilindrului rigiditatea materialului comprimat crește și deci energia consumată per ciclu scade (fig.3.13).

În cazul prezentat, testele au fost desfășurate pentru un raport între frecvența de oscilație și viteza de deplasare relativă a cilindrului de aproximativ 120 cicluri/metru.

Din rezultatele testelor efectuate în laborator se observă clar că suprapunerea încărcării dinamice determină o creștere importantă a cantității compresiunii. Deasemenea, rezultatele arată că efectul de compactare obținut poate fi reprezentat prin cele două componente: cea statică, produsă de rularea cilindrului fără vibrație, și cea dinamică, care corespunde compactării suplimentare obținută în urma pornirii vibrațiilor.

3.1.5 Modelarea solurilor necoezive încărcate dinamic vertical

Modelarea solului ia în considerare faptul că în zona de contact cilindru – sol apar efecte elasto-plastice, iar în adâncime se dezvoltă o comportare elastică (Wolf, 1994). Utilizând procedeul suprapunerii efectelor, solul se consideră ca fiind compus din două substructuri, zonele elastică și plastică, modelate separat. În final rezultatele sunt suprapuse respectând condițiile de compatibilitate.

În *modelarea comportării elastice*, solul este reprezentat ca un semispațiu linear elastic, alcătuit dintr-un material omogen cu densitatea specifică ρ . Neglijând efectul vâscozității, relația effort – deformație specifică este descrisă prin intermediul a două constante elastice, care în dinamica solurilor sunt modulul rezistenței la tăiere G și coeficientul lui Poisson ν . Totuși, întrucât în problema de față se va aplica modelarea semispațiului prin intermediul unui con, este convenabil să fie considerată 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 . Relațiile de legătură dintre acești parametri sunt:

$$G = \frac{E}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu}, \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{și} \quad \nu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2} \quad (3.6)$$

unde E este modulul de elasticitate.

Semispațiul este idealizat printr-un con elastic semi-infinit de înălțime ζ_0 , iar suprafața de contact dintre sol și cilindru este considerată ca o bază rigidă fără masă, de arie A_0 (fig.3.14). Raza echivalentă a unui disc circular de aceeași arie cu baza rigidă este notată r_0 . Deschiderea unghiulară a conului este determinat de raportul ζ_0/r_0 . Prin aplicarea încărcării pe disc, eforturile din semi-spațiul 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.

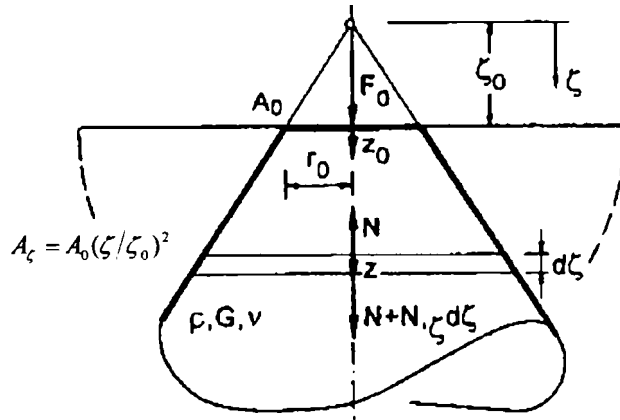


Figura 3.14 Modelul conului semi-infinit elastic

Având în vedere forțele axiale și de inerție, echilibrul dinamic al unui element de con de grosime infinit mică este exprimat prin următoarea ecuație:

$$-N + N + \frac{\partial N}{\partial \zeta} d\zeta - \rho A_\zeta \cdot d\zeta \cdot \ddot{z} = 0 \quad (3.7)$$

adică
$$\frac{\partial N}{\partial \zeta} - \rho A_\zeta \ddot{z} = 0 \quad (3.7')$$

Știind că $N = A_\zeta \sigma = A_\zeta E \frac{\partial z}{\partial \zeta}$, ecuația (3.7') devine $2 \frac{\partial z}{\partial \zeta} + \zeta \frac{\partial^2 z}{\partial \zeta^2} - \frac{\zeta \cdot \ddot{z}}{v_p^2} = 0$,

care se poate scrie

$$\frac{\partial^2 [\zeta \cdot z]}{\partial \zeta^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 [\zeta \cdot z]}{\partial t^2} = 0 \quad (3.8)$$

Ecuția (3.8) are forma ecuației generale de mișcare a unei uni-dimensionale, pentru care soluția se poate scrie sub următoarea formă generală: $z = f_1(\zeta - v_p t) + f_2(\zeta + v_p t)$ (f_1 și f_2 reprezintă undele longitudinale deplasându-se în sensul pozitiv, respectiv negativ, al direcției ζ). Considerând că deplasarea z_0 de la nivelul suprafeței corespunde forței F_0 de interacțiune sol - cilindru, soluția ecuației (3.8) este:

$$z(\zeta, t) = \frac{\zeta_0}{\zeta} \cdot z_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right) \quad (3.9)$$

în care s-au considerat numai undele care se deplasează în sensul pozitiv al direcției ζ .

Forța axială de la nivelul oarecare ζ va fi:

$$N = A_{\zeta} \sigma = A_{\zeta} E \frac{\partial z}{\partial \zeta} = -A_0 \frac{\zeta^2}{\zeta_0^2} \rho v_p^2 \left[\frac{\zeta_0}{\zeta^2} \cdot z_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right) + \frac{\zeta_0}{\zeta v_p} \cdot z'_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right) \right] =$$

$$= -\frac{A_0 \rho v_p^2}{\zeta_0} \cdot z_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right) - A_0 \rho v_p \frac{\zeta}{\zeta_0} \cdot z'_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right) \quad (3.10)$$

în care $z'_0 \left(t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p} \right)$ este derivata deplasării z_0 în raport cu argumentul $t - \frac{\zeta - \zeta_0}{v_p}$. Notând cu $z'_{0(\zeta=\zeta_0)} = \dot{z}_{0(\zeta=\zeta_0)} = \dot{z}_0$, derivata deplasării la nivelul ζ_0 ,

forța axială corespunzătoare este:

$$N_{(\zeta=\zeta_0)} = -\frac{A_0 \rho v_p^2}{\zeta_0} z_0 - A_0 \rho v_p \dot{z}_0 \quad (3.11)$$

Din condiția de echilibru la nivelul de contact sol – cilindru, forța de interacțiune la un moment oarecare t este egală cu $-N_{(\zeta=\zeta_0)}$, dar poate fi scrisă ca pentru un sistem cu un grad de libertate:

$$F_0(t) = -N(t)_{(\zeta=\zeta_0)} = \frac{A_0 \rho v_p^2}{\zeta_0} z_0 + A_0 \rho v_p \dot{z}_0 = kz_0 + c\dot{z}_0 \quad (3.12)$$

Astfel coeficienții de elasticitate și vâscozitate ai solului se obțin:

$$k = \frac{\rho v_p^2 A_0}{\zeta_0} \quad \text{și} \quad c = \rho v_p A_0 \quad (3.13)$$

Înălțimea ζ_0 a vârfului de con depinde de raza echivalentă r_0 și de vitezele de propagare a undelor produse de încărcarea dinamică verticală (viteza primară și viteza undelor Rayleigh) $\frac{\zeta_0}{r_0} = \frac{v_p}{v_R}$.

Știind că $v_R = Vv_s$, unde V este un factor ce poate fi determinat numeric în funcție de coeficientul lui Poisson, se obține că înălțimea vârfului de con depinde de aria suprafeței de încărcare A_0 și de coeficientul lui Poisson ν . Înlocuirea bazei circulare cu una rectangulară echivalentă $A_0 = 4a_0b_0$, conduce la următoarea expresie:

$$\zeta_0 = \frac{8a_0 \frac{(1-\nu)^2}{1-2\nu}}{3.1 \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^{0.75} + 1.6} \quad (3.14)$$

cu ajutorul căreia coeficienții de elasticitate și vâscozitate pot fi rescriși ca funcții de parametrii de elasticitate ai solului G și ν , și de dimensiunile a_0 și b_0 ale suprafeței rectangulară de contact sol – cilindru:

$$k = Gb_0 \frac{1}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^{0.75} + 1.6 \right] \quad \text{și} \quad c = 4a_0b_0 \sqrt{2\rho G \frac{1-\nu}{1-2\nu}} \quad (3.13')$$

În mod teoretic, având în vedere că lățimea $2b_0$ a suprafeței de contact variază odată cu penetrarea cilindrului pe parcursul unui ciclu, cei doi coeficienți nu sunt constanți.

Modelarea zonei plastice este realizată pentru cazul specific al compactării cu cilindrul 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 (fig.3.15).

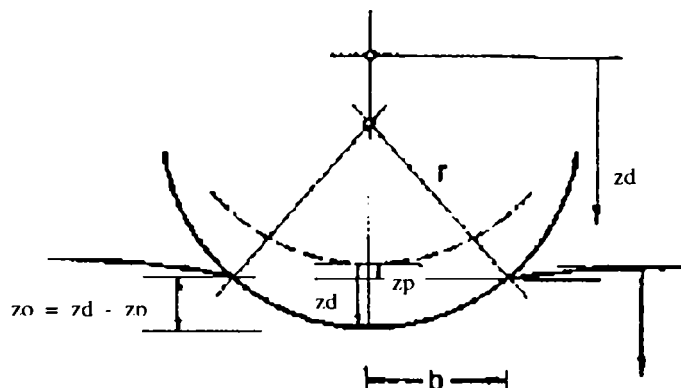


Figura 3.15 Deformația elasto-plastică a solului necoeziv sub impactul cilindrului

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

$$N_B = A\sigma_B \quad (3.15)$$

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

$$\sigma_B = cN_c s_c + \gamma_o t N_q s_q + \gamma 2b N_\gamma s_\gamma \quad (3.16)$$

este tensiunea de compresiune capabilă pe teren dată de formula Prandtl-Buisman (c coeziunea solului, γ greutatea specifică a solului, γ_o greutatea specifică a umpluturii laterale (eventuală), t grosimea umpluturii, N_c , N_q și N_γ factori ai capacității portante, s_c , s_q și s_γ coeficienți de formă).

Întrucât solul considerat (material de umplură granular) este necoeziv, $c = 0$, iar cilindrul se află la suprafața terenului $t = 0$ (nu există umplură laterală), primii doi termeni ai formulei 3.16 se anulează. În plus, întrucât 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). Astfel, capacitatea portantă a materialului va fi dată de următoarea expresie:

$$N_B = 16\gamma N_y ar z_p = 16\gamma N_y ar (z_d - z_0) \quad (3.15')$$

în care coeficientul de formă s_γ s-a considerat unitar ca pentru suprafețe dreptunghiulare înguste.

Factorul capacității portante corespunzător greutatei specifice se calculează

cu relația:
$$N_y = \left[e^{\pi \gamma \phi} \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 1 \right] \operatorname{tg} \phi.$$

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

$$k_p = 16\gamma N_y ar \quad (3.17)$$

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

$$F_p = k_p z_p = k_p (z_d - z_0) \quad (3.18)$$

Din această expresie se observă că echilibrul plastic se dezvoltă ca o relație lineară forță - deplasare. Întrucât pe parcursul fazei de descărcare (de ridicare a cilindrului) în sol au loc doar efecte elastice, relația 3.18 este valabilă numai pentru faza de încărcare (fig.3.16.a).

Figura 3.17 prezintă comportarea elasto-plastică a solului încărcat de cilindrul vibrator. În conformitate cu teoria prezentată, deformațiile plastice sunt lineare (relația 3.18), iar, corespunzător teoriei prin care s-a obținut coeficientul de elasticitate k , deformațiile elastice sunt neliniare (expresiile 3.2 și 3.3').

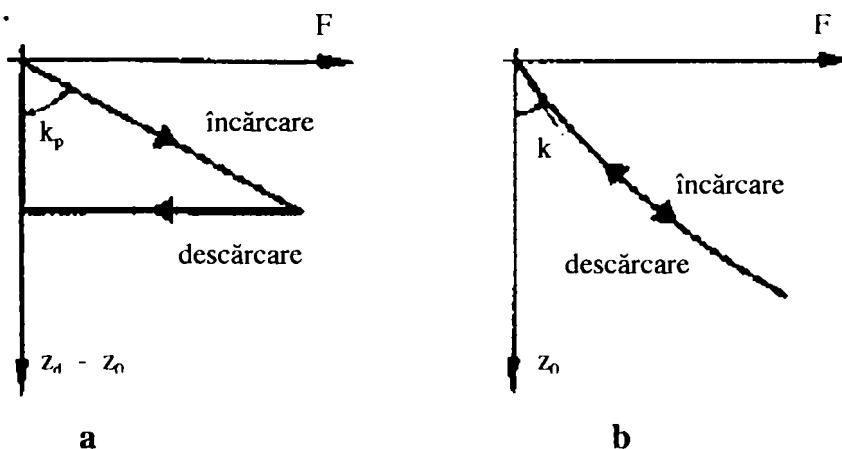


Figura 3.16 Relația forță - deplasare în cazul comportărilor plastice ideale (a) și elastice ideale (b)

Materialul compactat, cu ambele substructuri considerate în modelarea acestuia, și cilindrul excitat dinamic al cilindrului vibrator, sunt suprapuse respectând *condițiile de compatibilitate*. Având în vedere că între sol și cilindru nu pot apare întinderi, trebuie luată în considerare pierderea contactului.

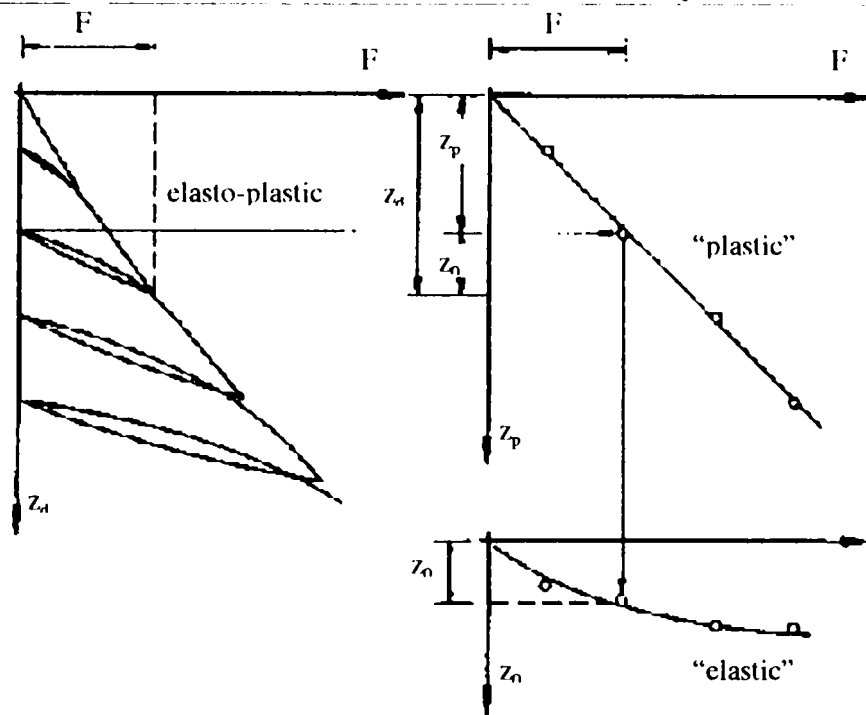


Figura 3.17 Stabilirea punctuală a deformațiilor plastice și elastice ale solului

În procesul compactării dinamice cu cilindrul vibrator, sistemul sol – cilindru parcurge trei faze distincte pe perioada unui ciclu de operare.

- *Faza de încărcare*, definită de o forță de contact cu intensitate crescândă ($F > 0$ și $\Delta F > 0$), care cauzează în sol deformații elasto-plastice ($z_d = z_0 + z_p$). Ambele forțe, elastică (relația 3.12) și plastică (relația 3.18), alcătuiesc forța de contact din ecuația diferențială a mișcării cilindrului din sistemul cu două grade de libertate (ecuația 3.2): $F_s = F_0 + F_p$.

$$m_r \ddot{z}_d + c_t (\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_t (z_d - z_f) = m_e e \omega^2 \sin \omega t - k z_0 - c \dot{z}_0 - k_p z_p \quad (3.19)$$

- *Faza de descărcare*, definită prin forță de contact descrescândă ($F > 0$ și $\Delta F \leq 0$), pe parcursul căreia au loc numai deformații elastice ($z_d = z_0$). Forța de contact este determinată de comportarea elastică $F_s = F_0$.

$$m_r \ddot{z}_d + c_t (\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_t (z_d - z_f) = m_e e \omega^2 \sin \omega t - k z_d - c \dot{z}_d \quad (3.20)$$

- *Faza de salt*, definită prin pierderea contactului dintre cilindru și sol ($F_s = 0$), și care nu apare numai în cazul în care excitarea cilindrului este prea puternică sau dacă materialul compactat este prea dur. În acest caz, cilindru și sol se mișcă independent unul față de celălalt.

$$m_r \ddot{z}_d + c_t (\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_t (z_d - z_f) = m_e e \omega^2 \sin \omega t \quad (3.21)$$

$$\text{și } c \dot{z}_0 + k z_0 = 0 \quad (3.12')$$

Pentru situația sistemului cu două grade de libertate, cea de a doua ecuație diferențială, ce descrie mișcarea cadrului de susținere a cilindrului, va fi aceeași pentru toate cele trei faze (ecuația 3.3). În cazul simplificat al sistemului considerat cu un grad de libertate, ecuația diferențială ce definește mișcarea cilindrului vibrator în cele trei faze (3.19, 3.20 și 3.21) se obține prin anularea coeficienților k_t și c_t .

3.2 Determinarea gradului de compactare obținut cu ajutorul cilindrului vibrator

Compactarea umpluturilor de material granular este în general realizată prin intermediul cilindrului vibrator de 4 până la 25 de tone, ce parcurg câteva treceri pentru fiecare strat. Datorită neomogenității materialului suport și a materialului de compactat, procedurile de compactare determină local un grad de compactare mai mult sau mai puțin ne-uniform. În aceste condiții, în corpul construcției finale pot apărea ulterior tasări inegale și ca urmare fisuri.

Astfel, măsurarea gradului de compactare a unei umpluturi cu material granular din corpul unei construcții de retenție este în mod frecvent o cerință în realizarea acesteia. Este important ca măsurătorile efectuate să reflecte calitatea compactării cât mai exact posibil, pe toată grosimea stratului compactat.

3.2.1 Metode clasice de control a compactării

Pentru a verifica densitatea sau rigiditatea unui strat de material granular compactat, controlul în teren este în mod uzual efectuat prin metode de testare punctuale. Cele mai curențe metode punctuale pentru determinarea in-situ a densității unui material granular sunt (Parsons, 1992): metoda înlocuirii cu nisip (a conului cu nisip), metoda balonului de cauciuc și metoda nucleară. Rigiditatea stratului compactat este în general determinată prin metoda încărcării statice capabile (Forssblad, 1981).

Metoda înlocuirii cu nisip constă în excavarea unei cavități aproximativ cilindrice în stratul compactat și cântărirea precisă a materialului extras (m_c). Conținutul de apă al materialului este stabilit după determinarea greutatea în stare uscată (m_{cu}). Volumul excavat este determinat prin măsurarea greutatea unui nisip etalon (cu granulometrie uniformă) care umple exact cavitatea. Dispozitivul cu care este realizat acest test este format dintr-un recipient din sticlă sau plastic, la gura căruia este atașat un con de metal (fig.3.18). Recipientul umplut cu nisipul etalon pentru care se cunoaște densitatea uscată (δ_n), și având conul atașat, este cântărit, iar apoi este inversat și plasat deasupra cavității excavate. După ce cavitatea este umplută cu nisip, dispozitivul este recântărit, iar prin scădere se află masa nisipului rămas în excavație (m_n). Volumul cavității (V) este dat de raportul dintre masa nisipului etalon din excavație și densitatea lui specifică (m_n/δ_n), iar densitatea specifică a materialului compactat este dată de raportul dintre masa în stare uscată a materialului excavat și volumul cavității (m_{cu}/V).

Metoda balonului de cauciuc este în principiu foarte similară metodei înlocuirii cu nisip, diferența constând în faptul că volumul cavității excavate este determinat pe baza volumului de apă necesar umflării unui

balon de cauciuc care umple complet cavitatea. Locul recipientul pentru nisip din metoda înlocuirii cu nisip este în acest caz luat de un vas calibrat.

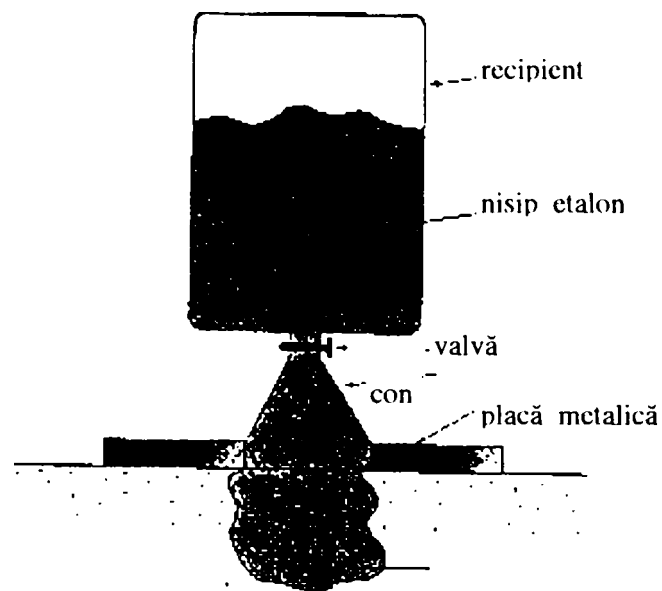


Figura 3.18 Metoda înlocuirii cu nisip pentru determinarea densității in-situ

Determinarea densității cu ajutorul metodelor nucleare se bazează pe difuzia și absorbția în sol a radiațiilor gamma emise de o mică sursă. Intensitatea radiațiilor gamma care ating un receptor situat la o anumită distanță depinde în principal de densitatea mediului pe care îl străbat. Cu cât densitatea materialului compactat este mai mare, cu atât intensitatea radiației detectate este mai mică. Se disting patru tipuri principale de dispozitive care utilizează principiul metodei nucleare: dispozitiv cu transmitere directă la suprafață (fig.3.19.a), dispozitiv cu transmisie indirectă la suprafață (fig.3.19.b), dispozitiv de transmisie directă cu probă dublă (fig.3.19.c) și dispozitiv cu transmisie indirectă cu probă de adâncime.

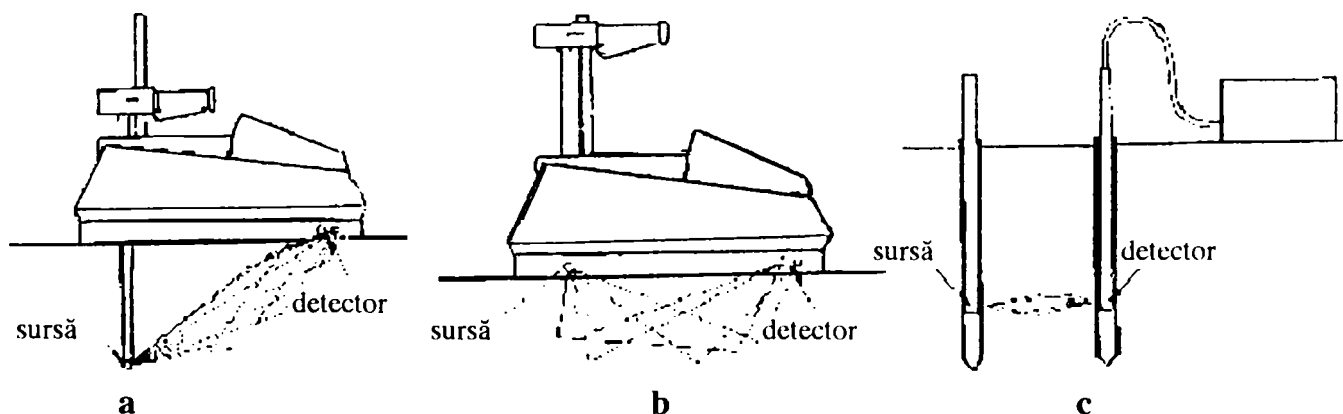


Figura 3.19 Dispozitive de măsură a densității pe baza metodei nucleare

Dispozitivele nucleare sunt sensibile la variațiile din sol și trebuie în general calibrate pentru fiecare tip de material compactat. Corelarea densității solului cu intensitatea radiației detectate se realizează cu ajutorul

unor epruvete din materiale cu densitate cunoscută, sau prin comparare cu rezultatele altor metode in-situ de determinare a densității.

Pentru a avea o indicație asupra rezistenței, gradul de compactare a unei umpluturi din material granular poate fi verificat cu ajutorul testelor in-situ de încărcare statică capabilă (fig.3.20). În urma testării, modulul de elasticitate (sau de deformație) al unui material compactat se calculează cu următoarea formulă:

$$E = 1.5 \frac{r \cdot P}{s} \quad (3.22)$$

în care r este raza plăcii de încărcare, p reprezintă încărcarea pe unitatea de suprafață, iar s deformația sub încărcarea statică.

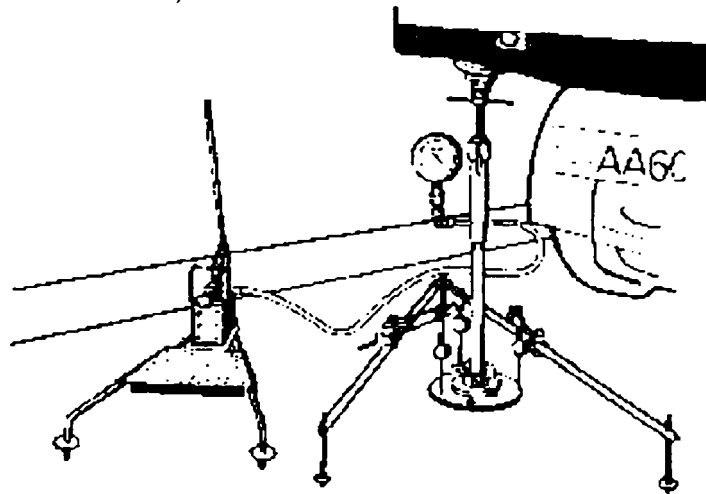


Figura 3.20 Dispozitiv de testare a capacității portante a unei umpluturi din material granular sub încărcare statică

În special în cazul materialelor granulare, există în general o bună relație între modulul de elasticitate determinat și densitate. Totuși, întrucât proprietățile elastice ale materialelor granulare fine sunt puternic influențate de conținutul de apă, acest test nu poate fi aplicat întotdeauna ca test de densitate.

Deși sunt aplicate în mod curent, toate aceste metode de testare a gradului de compactare obținut pentru o umplutură din material local, prezintă câteva dezavantaje comune: fiind punctuale, nu pot asigura uniformitatea rezultatului procesului de compactare; adâncimea de măsurare cu aceste metode este relativ mică (20 – 40 cm); rezultatele finale ale testelor sunt adeseori disponibile abia după circa o zi de la prelevarea materialului (timp necesar uscării); procedeele de testare sunt scumpe, iar pe lângă aceasta, în timpul efectuării testelor, lucrările de construcție din vecinătate trebuie oprite pentru a nu afecta rezultatul măsurătorii.

Din aceste motive, metodele convenționale de control al rezultatului procesului de compactare nu sunt întotdeauna suficiente, mai ales pentru lucrări de calitate superioară.

3.2.2 Controlul continuu al compactării

Pentru a obține un grad de compactare suficient dar în același timp o capacitate portantă și o tasare ulterioară uniforme, procesul de compactare a fost optimizat prin aplicarea unei metode de *control continuu al compactării* (CCC). Utilizând un cilindru vibrator cu sistem de control integrat, se poate obține în mod economic un nivel ridicat de calitate. Sistemul CCC se bazează pe măsurarea interacțiunii dinamice dintre cilindrul vibrator și materialul de compactat (Adam și Kopf, 2000). Oscilația cilindrului se schimbă în funcție de răspunsul materialului, iar acest fapt este utilizat pentru estimarea gradului de compactare atins. Odată ce într-o anumită zonă nu se mai observă schimbări în mișcarea de oscilație a cilindrului, înseamnă că nu se mai produc densificări ale materialului și deci procesul de compactare pe porțiunea respectivă poate fi oprit.

Astfel, pe lângă acțiunea sa de compactare, pe parcursul funcționării cilindrul vibrator este folosit și ca instrument de măsură (fig.3.21), mișcarea lui de oscilație fiind înregistrată (senzorul A), analizată (unitatea de procesare B) și imediat vizualizată (unitatea C). Localizarea cilindrului este realizată prin intermediul unui senzor auxiliar (D). Cu acest dispozitiv datele controlului sunt disponibile imediat în timpul procesului de compactare, pentru întreaga suprafață parcursă de utilaj.

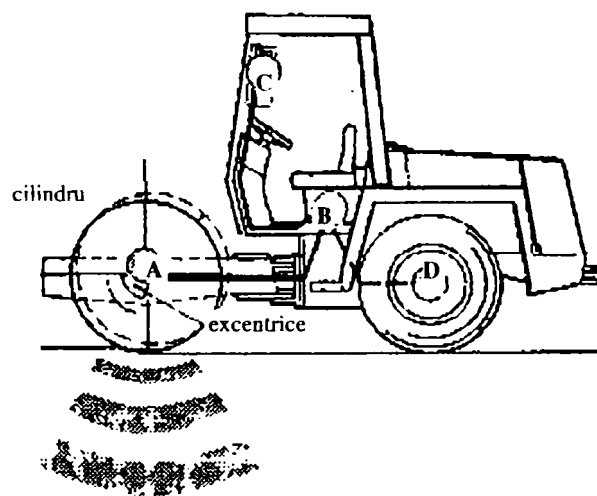


Figura 3.21 Principiul sistemului de control continuu al compactării

Datele oferite de sistemul CCC, respectiv desfășurarea lucrării de compactare, sunt influențate de parametrii utilajului: greutatea totală și raportul dintre greutatea cilindrului și a cadrului care îl susține, frecvența și amplitudinea mecanismului de vibrație, viteza de rulare.

În ceea ce privește sistemul de control continuu al compactării, solurile se clasifică în trei tipuri generale: necoezive, coezive și stabile, fiecare dintre acestea indicând o comportare diferită sub acțiunea încărcărilor dinamice. În cazul materialelor necoezive, în zona de contact cilindru – sol se

produc deformații specifice de tăiere ce cauzează deformații plastice (răspunzătoare pentru compactare).

Pentru ca sistemul CCC să furnizeze date corespunzătoare, parametrii utilajului trebuie să fie considerați în mod corect, în funcție de natura solului. În comparație cu cazul materialelor rigide, materialele cu rigiditate redusă necesită o amplitudine a mecanismului vibrator mai mare, o viteză de rulare mai redusă și un raport mai mic între greutatea cadrului și cea a cilindrului.

Cele două principale tipuri de dispozitive cu ajutorul cărora se poate realiza la ora actuală controlul continuu al compactării sunt *Compactometrul*, dezvoltat de compania suedeză Geodynamik, și *Terrametrul*, dezvoltat de compania germano-americană Bomag. Ambele dispozitive cuprind unul sau două accelerometre atașate axului de susținere a cilindrului vibrator. Accelerometrele înregistrează continuu accelerația mișcării cilindrului, iar acest semnal este analizat într-o unitate de procesare care determină valoarea compactării dinamice ținând cont de parametrii utilajului.

Sistemul *CCC cu Compactometru* se bazează pe relația de legătură dintre gradul de compactare atins și amplitudinea mișcării cilindrului vibrator, amplitudine ce corespunde unor frecvențe egale cu armonice ale frecvenței fundamentale de vibrație. Amplitudinea ce corespunde armonicelor frecvenței fundamentale de vibrație se compară cu amplitudinea ce corespunde fix frecvenței fundamentale. Întrucât în urma investigațiilor empirice s-a observat că amplitudinea corespunzătoare primei armonice a frecvenței fundamentale crește odată cu rigiditatea materialului compactat, valoarea dată de compactometru (CMV) se calculează prin raportarea amplitudinii accelerației corespunzătoare primei armonice la amplitudinea accelerației corespunzătoare frecvenței fundamentale de excitație (fig.3.22.a):

$$\text{CMV} \sim \frac{\hat{a}(2\omega_0)}{\hat{a}(\omega_0)} \quad (3.23)$$

Amplitudinea accelerației $\hat{a}(2\omega_0)$ corespunzătoare primei armonice a frecvenței fundamentale este stabilită pe baza semnalului recepționat de accelerometru, iar amplitudinea accelerației $\hat{a}(\omega_0)$ corespunzătoare fix frecvenței fundamentale de excitație este stabilită pe baza parametrilor mecanismului vibrator.

Pentru a lua în considerare și condiția de operare a cilindrului vibrator, dispozitivul Compactometru determină și valoarea numită de rezonanță (RMV). Aceasta este dată prin raportarea amplitudinii accelerației corespunzătoare jumătății frecvenței fundamentale la amplitudinea accelerației corespunzătoare fix frecvenței fundamentale de excitație:

$$RMV \sim \frac{\hat{a}(0.5\omega_0)}{\hat{a}(\omega_0)} \quad (3.24)$$

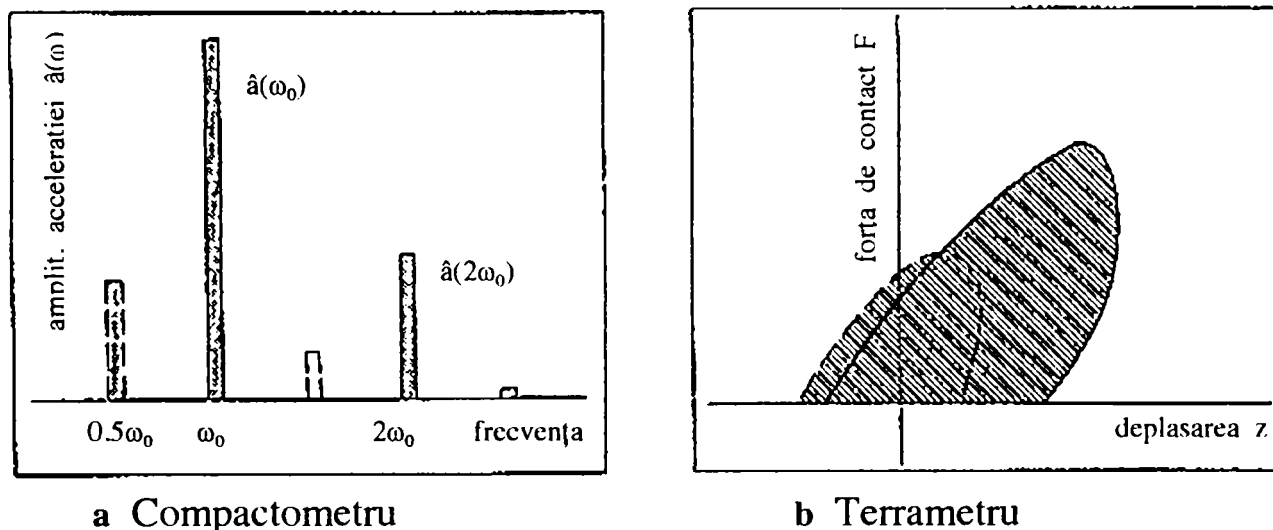


Figura 3.22 Principalele sisteme CCC

Sistemul CCC cu Terramtru se bazează pe relația de legătură dintre gradul de compactare atins și energia dezvoltată de cilindrul vibrator (respectiv absorbită de materialul compactat) pe parcursul procesului de compactare dinamică. Pentru a acoperi și situația condiției de operare de dublu salt, energia absorbită se calculează pentru două cicluri de excitare succesive (fig.3.22.b):

$$OMEGA \sim W_{eff} = \int_{2T} F_s \dot{z} dt = \int_{2T} (c\dot{z} + kz)\dot{z} dt \quad (3.25)$$

în care F_s este forța de interacțiune sol – cilindru, iar \dot{z} este viteza mișcării cilindrului.

Dispozitivul Compactometer, produs de Geodynamik, este prezentat în figura 3.23 (Thurner și Sandstrom, 2000). Pentru anumite caracteristici ale cilindrului vibrator, în cazul unui tip de material de compactat dat există un grad de compactare maxim, iar atunci când acesta este atins, CMV încetează să mai crească. În acest moment operatorul utilajului știe că parcurgerea ulterioară a zonei respective nu va mai îmbunătăți gradul de compactare. În conformitate cu indicațiile companiei producătoare, valorile date de compactometru (CMV) pentru materialele granulare de tipul nisipului se situează între 20 și 50.

Prin utilizarea unui sistem de afișaj care prezintă continuu poziția cilindrului vibrator pe suprafața de compactat în raport cu un punct de reper, împreună cu datele referitoare la gradul de compactare atins, lucrările de compactare desfășurate devin și mai eficiente (fig.3.24).

Schema operațională a sistemului de control continuu al compactării cu dispozitiv Terrameter, produs de Bomag, este ilustrat în figura 3.25 (Floss

și Kloubert, 2000). Sistemul poate fi deasemenea îmbunătățit cu un afișaj continuu al poziției utilajului și a gradului de compactare atins, și cu un sistem de memorare și tipărire a datelor.

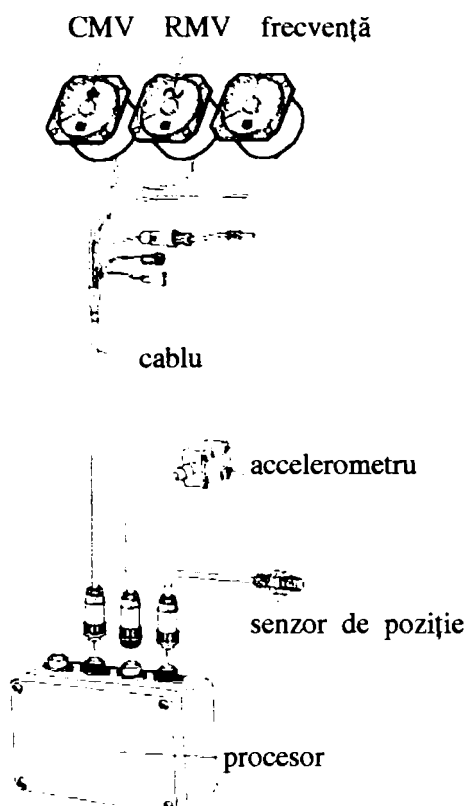


Figura 3.23 Dispozitivul Compactometer

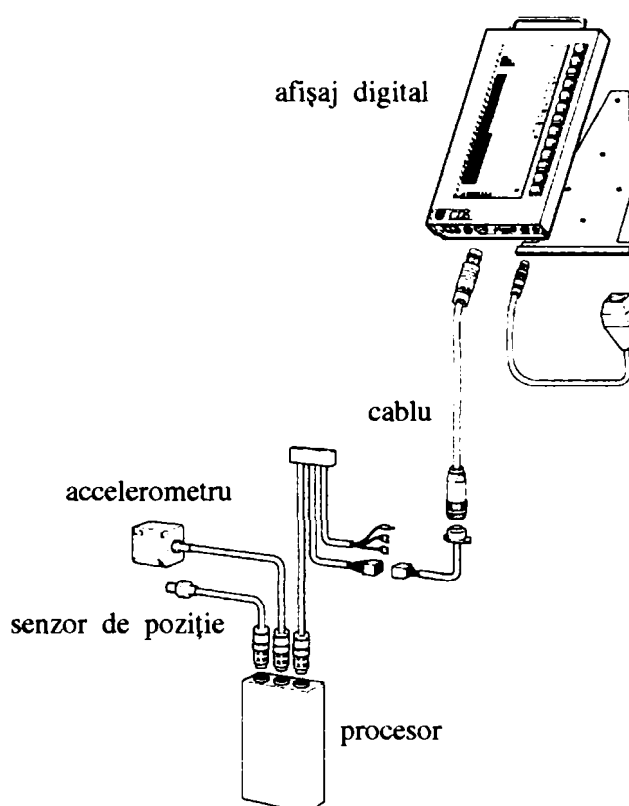
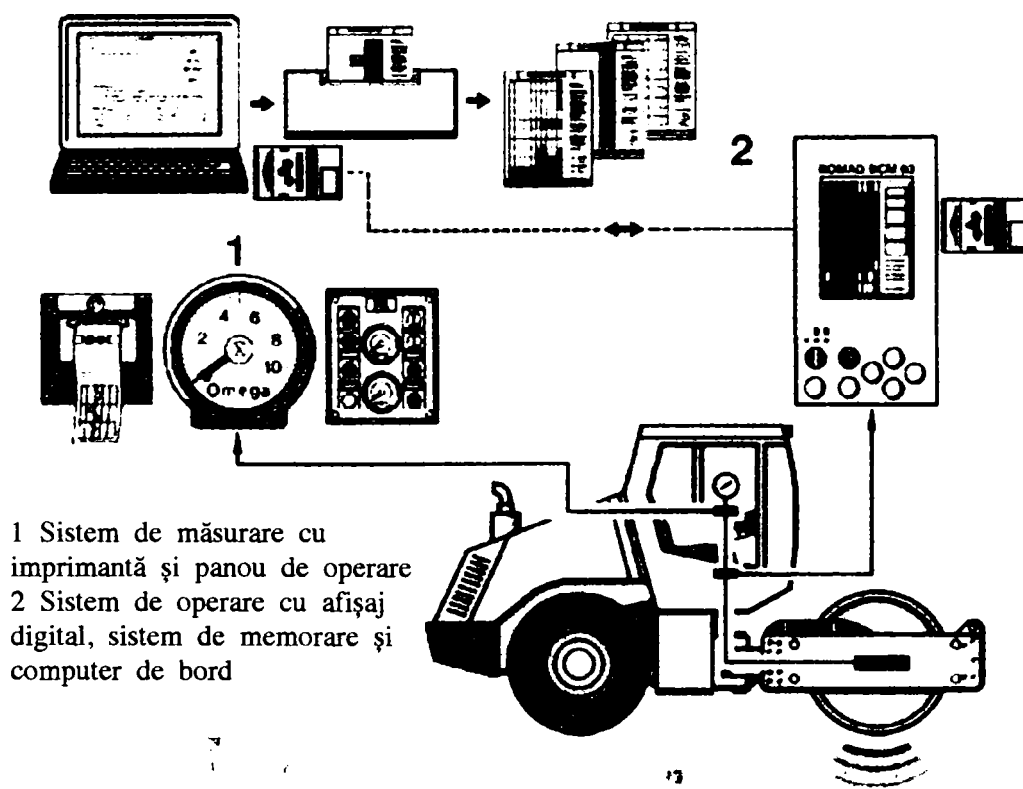


Figura 3.24 Compactometer cu sistem de afișaj digital



1 Sistem de măsurare cu imprimantă și panou de operare
 2 Sistem de operare cu afișaj digital, sistem de memorare și computer de bord

Figura 3.25 Sistemul CCC cu Terrameter

Evoluția tipică, determinată analitic, a datelor compactării dinamice (CMV, RMV și OMEGA) odată cu creșterea rigidității materialului compactat, este prezentată în figura 3.26. În cazul contactului continuu al cilindrului cu materialul compactat (cu rigiditate scăzută), accelerația corespunzătoare primei armonice a frecvenței fundamentale aproape că nici nu apare, și deci mărimea CMV este foarte redusă. Pe parcursul operării cu desprindere parțială a cilindrului de materialul compactat, CMV crește aproximativ linear cu rigiditatea materialului. În momentul în care cilindrul atinge situația de operare cu dublu salt, CMV descrește brusc, pentru ca apoi să crească din nou. Deși evoluția valorii OMEGA este în general similară cu cea a valorii compactometrului (CMV), totuși, pe parcursul operării cu desprindere parțială gradientul curbei de evoluție descrește (întrucât în această situație scade continuu și durata de contact), iar în momentul când se atinge situația de operare cu dublu salt căderea nu mai este tot atât de bruscă (întrucât integrarea se realizează pentru două cicluri de excitare consecutive).

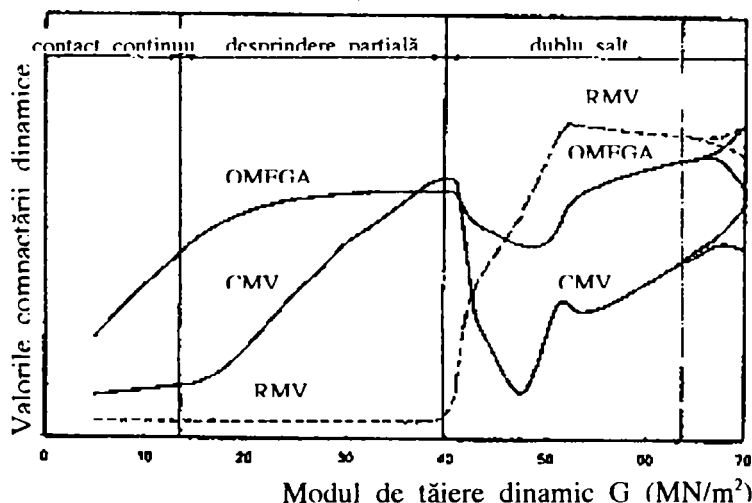


Figura 3.26 Evoluția valorilor compactării dinamice ca funcție de modulul de tăiere dinamic

Odată ce mișcarea cilindrului devine, datorită unei rigidități foarte ridicate a materialului compactat, neregulată (sau chiar haotică), gradul de compactare a atins nivelul maxim posibil pentru parametrii dați ai utilajului, iar valorile compactării dinamice determinate de cele două sisteme CCC nu mai sunt relevante.

Variația tipică a valorii date de compactometru (CMV) de-a lungul parcurgerii unei fâșii de compactat (fig.3.27) furnizează informațiile necesare pentru a impune criteriile de control al compactării:

- valoarea minimă (MIN) necesară pentru a localiza zonele sensibile (insuficient compactate);
- valoarea maximă (MAX) care indică zonele cu cele mai ridicate valori ale rigidității;
- valoarea medie (MV) utilizată în stabilirea condițiilor generale a zonei verificate;

- deviația standard (SD) utilizată în stabilirea gradului de uniformitate a rezultatelor compactării în zona verificată;
- creșterea valorii compactării dinamice (CRE) utilizată pentru a evidenția compactabilitatea ulterioară;
- descreșterea valorii compactării dinamice utilizată ca un indiciu al relaxării sau/și al zdrobirii granulelor.

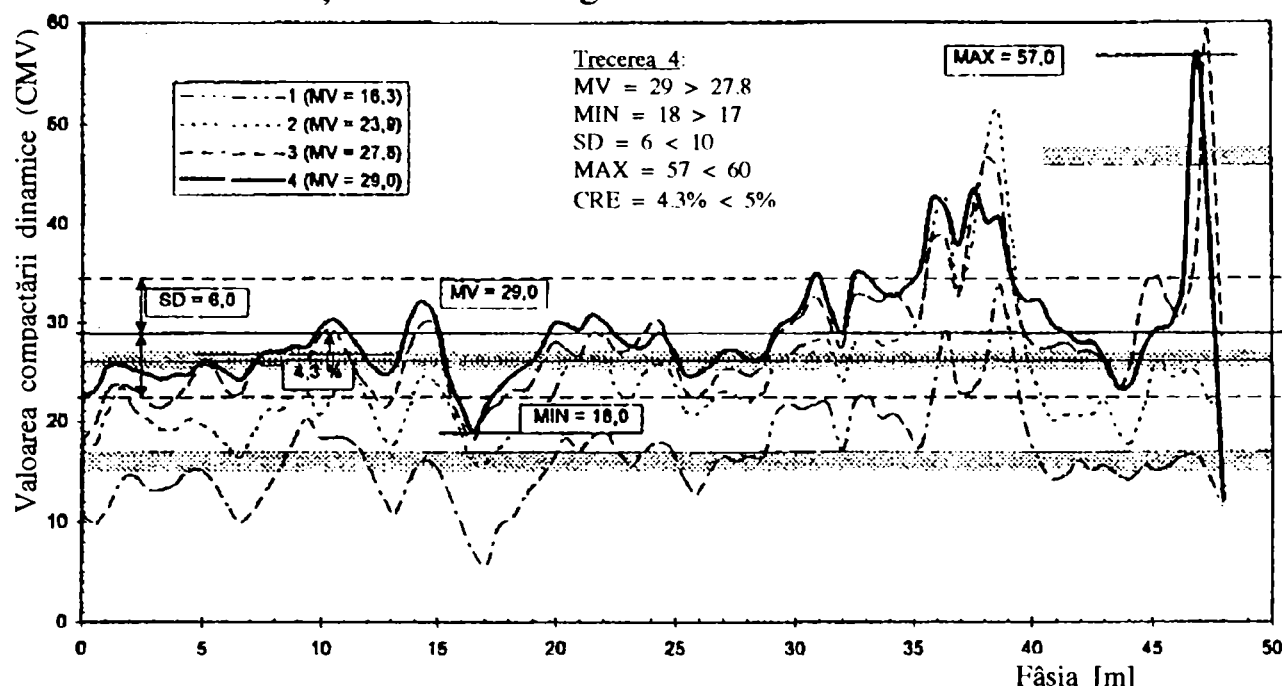


Figura 3.27 Variația tipică a CMV în lungul unei fâșii de compactat

Stabilirea limitelor pentru valoarea compactării dinamice (CMV), în special a celei inferioare care indică o compactare suficientă, este o problemă încă deschisă pentru că CMV reflectă compactarea materialului numai din punct de vedere calitativ, nu și cantitativ. Chiar dacă CMV sau valoarea OMEGA au un fundament fizic, acestea nu pot reprezenta direct niște rezultate stabilite în mod obișnuit prin metodele convenționale (și anume densitatea sau modulul de elasticitate dat de testul încărcării statice).

O evaluare cantitativă a compactării necesită o calibrare a sistemului CCC, calibrare realizată cu ajutorul unor date stabilite prin intermediul metodelor convenționale punctuale. Metodele convenționale trebuie aplicate în câteva puncte, atât cele caracterizate de valori ale compactării dinamice maxime (MAX), cât și cele caracterizate de valori minime (MIN) și valori medii (MV). Pe parcursul efectuării calibrării trebuie de asemenea luate în considerare condițiile particulare ale materialului compactat și cele de operare ale cilindrului vibrator. În mod curent se obține o bună corelare a valorilor compactării dinamice cu modulul de elasticitate stabilit prin metoda încărcării statice capabile (fig.3.28).

Având în vedere principiul de funcționare al sistemului de Control Continuu al Compactării, următoarele avantaje pot fi menționate pentru cazul în care acest sistem este aplicat în procesul compactării:

- lucrarea este ghidată în mod eficient asupra zonelor care necesită îmbunătățiri, determinând astfel uniformizarea rezultatului compactării;
- este prevenit supra-compactarea sau relaxarea produse ca urmare a parcurgerii excesive;
- prin avertizarea în cazul condițiilor instabile de operare, determină creșterea vieții de funcționare a utilajului;
- ajută în selectarea punctelor reprezentative pentru efectuarea testelor convenționale.

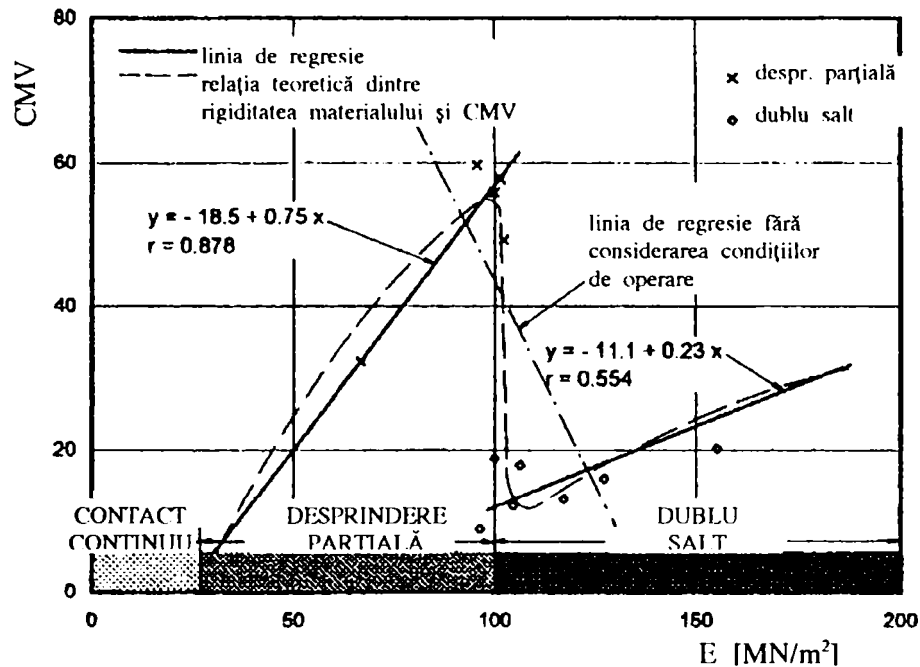


Figura 3.28 Model de corelare între CMV și modulul de elasticitate obținut prin metoda încărcării statice capabile

Notă: Estimarea gradului de compactare prin sistemul CCC poate fi integrat într-un procedeu prin care se controlează și modifică frecvența de vibrație și amplitudinea ce caracterizează mecanismul vibrator al utilajului. Ar fi foarte folositor ca cilindrul vibrator să fie dotat cu un sistem capabil să modifice parametrii de lucru (i.e. frecvență, amplitudine, viteză de rulare) în funcție de caracteristicile variabile ale materialului de compactat. În acest fel, utilajul ar determina un maxim posibil de transfer al energiei efective către materialul de compactat, și deci s-ar obține o compactare omogenă în cel mai scurt timp de lucru posibil.

Un astfel de procedeu pentru corelarea automată a compactării poate fi realizat după următorul model (Sandstrom, 1998): se dispun niște valori inițiale pentru amplitudinea și frecvența de vibrație și pentru viteza de rulare; se rulează utilajul pe o distanță scurtă pentru a estima caracteristicile materialului de compactat (modulul de rezistență la tăiere și un parametru de plasticitate) prin intermediul valorilor compactării dinamice (date de sistemul CCC); pe baza caracteristicilor materialului se calculează valorile corespunzătoare pentru amplitudinea și/sau frecvența de vibrație, și viteza de rulare; se corectează parametrii de funcționare ai

utilajului la noile valori calculate; în continuare, pe parcursul procesului de compactare, se reiau permanent cele trei etape anterioare.

Modulul de rezistență la tăiere al materialului de compactat nu este constant ci depinde de mărimea deformației și viteza de deformare. Parametrul de plasticitate corespunde adâncimii deformației remanente (maxime) a materialului după o încărcare statică din partea cilindrului.

Numărul combinațiilor frecvență - amplitudine este limitat de diverse condiții fizice (fig.3.29):

- a- amplitudinea vibrațiilor depinde de mărimea greutateilor excentrice a mecanismului vibrator, care este limitată de dimensiunile cilindrului și rezistența suportului (cadrului de susținere);
- b- frecvența de vibrație este limitată superior în funcție de pompele hidraulice și puterea motorului mecanismului vibrator;
- c- frecvența de vibrație este limitată inferior astfel încât să nu producă rezonanța cadrului;
- d- combinațiile frecvență ridicată - amplitudine mare trebuie limitate pentru a nu produce supraîncărcarea sistemului de excitație.

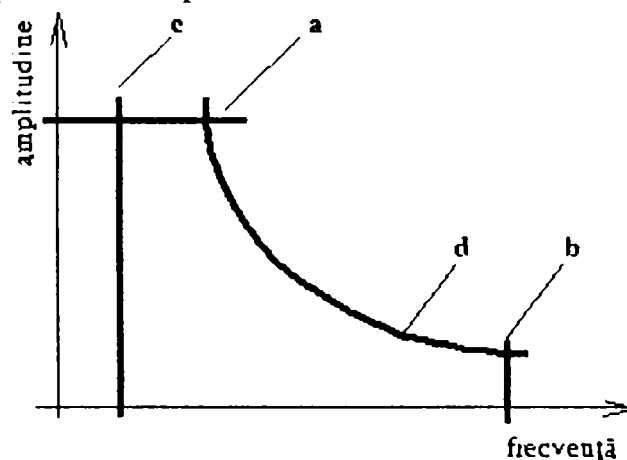


Figura 3.29 Limitele domeniului de operare pentru parametrii mecanismului vibrator

În mod practic, metoda de control și corelare automată presupune parcurgerea următoarelor etape:

1. având în vedere că pentru început materialul depus nu este compactat, prima rulare începe cu o frecvență joasă și o amplitudine maximă (o pereche de valori corespunzătoare limitei a din figura 3.29);
2. după parcurgerea primilor decimetri, se estimează modulul de rezistență G și parametrul de plasticitate p ce caracterizează materialul de compactat în această fază, și se determină valoarea corespunzătoare pentru frecvența de vibrație;
3. se dispune amplitudinea maxim posibilă pentru această frecvență (dacă operarea devine instabilă, se reduce frecvența dar se păstrează nivelul amplitudinii) și, considerând că materialul depus este în continuare omogen, se continuă parcurgerea fâșiei de compactat cu această pereche de valori;

4. pentru următoarele parcurgeri, pe măsură ce rigiditatea materialului de compactat crește, de fiecare dată frecvența este recalculată iar amplitudinea se modifică la valoarea corespunzătoare maximă impusă de limitele prezentate în figura 3.29.

Respectând etapele prezentate anterior, punctele ce reprezintă perechile de operare frecvență - amplitudine (fig.3.30) se situează pe o curbă aproximativ paralelă cu curba de limită **d** din figura 3.29.

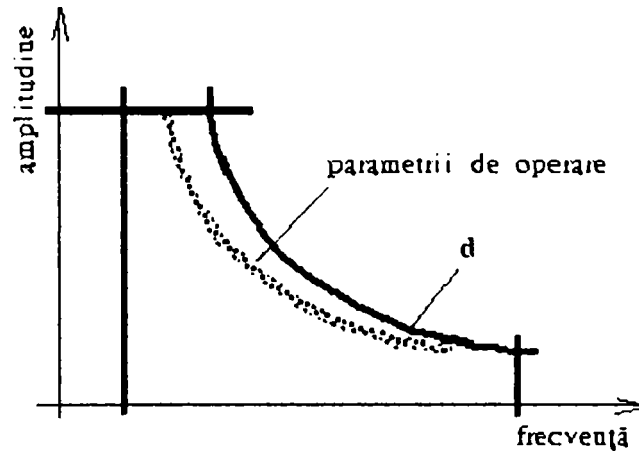


Figura 3.30 Distribuția perechilor frecvență - amplitudine pentru operarea mecanismului vibrator

Dacă materialul depus este neomogen (având rigiditate diferită de la o zonă la alta), în momentul trecerii într-o zonă cu modul de rezistență la tăiere diferit, parametrii de operare sunt imediat controlați și corelați cu situația corespunzătoare. Procedura se repetă la fiecare parcurgere.

3.3 Influența conținutului de apă al unui material granular asupra rezultatului compactării

Conform diverselor studii care s-au ocupat de compactarea umpluturilor din materiale granulare, printre alți factori care influențează rezultatul acestui proces (e.g. caracteristicile materialului, grosimea stratului depus, energia consumată), conținutul de apă w (%) are un efect important.

3.3.1 Comportarea materialelor granulare umede supuse compactării

În urma testelor de compactare s-a observat că, în cazul materialelor granulare cu un conținut redus de apă, densitatea atinsă ρ_d (kg/m³) este relativ joasă, iar apoi crește odată cu w . Dacă în condițiile unui efort de compactare convențional (dezvoltat spre exemplu într-o serie de teste standard Proctor), se reprezintă variația densității maxim obținute ca o funcție de conținutul de apă (fig.3.31), se observă că ρ_d atinge un vârf, după care o creștere a lui w determină o scădere a densității obținute. Conținutul de apă pentru care densitatea maxim obținută prezintă un vârf reprezintă conținutul de apă optim (w_{opt}) pentru compactarea în condițiile date.

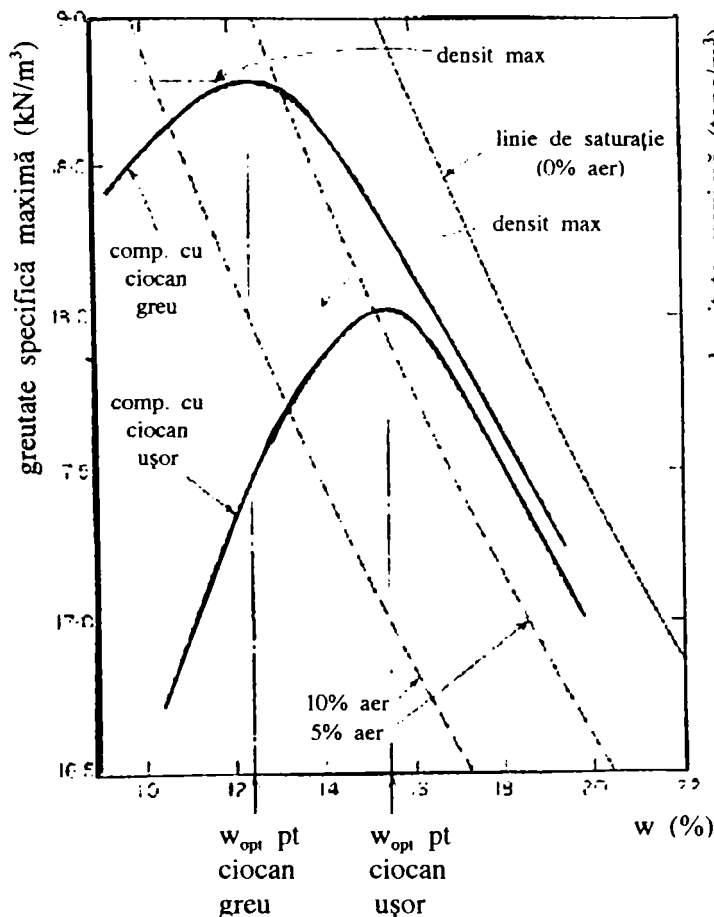


Figura 3.31 Curbe $\rho_d - w$ stabilite prin teste Proctor (Scott, 1980)

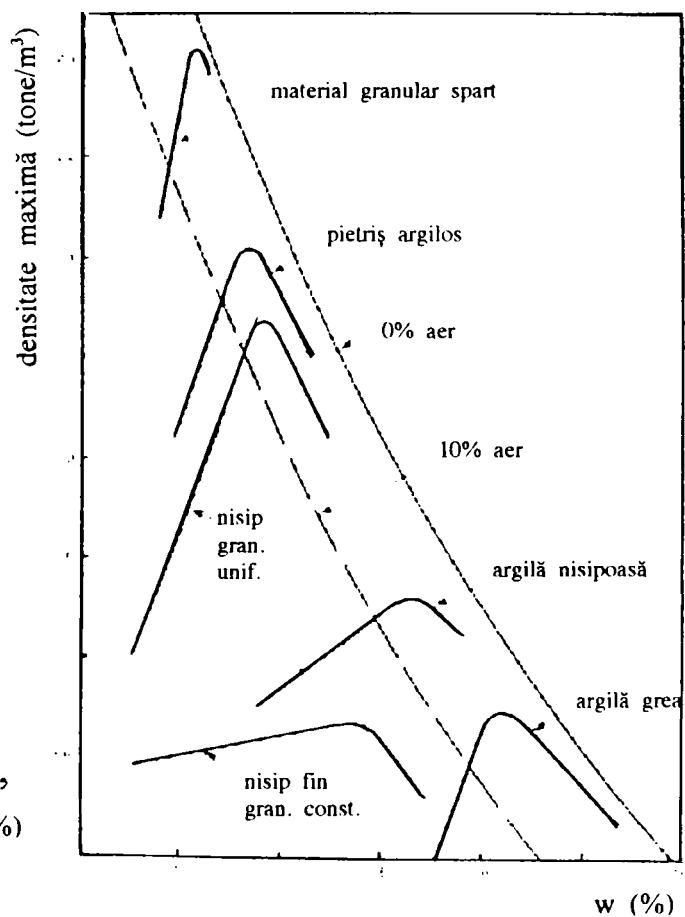


Figura 3.32 Rezultate tipice de teste Proctor (Parsons, 1992)

Fenomenul este înțeles mai bine dacă pe diagrama respectivă se reprezintă și câteva linii caracteristice conținutului de aer (relații de legătură $\rho_d - w$ pentru diverse procente ale conținutului de aer din materialul granular). Pentru cazul materialului considerat în figura 3.31, vârful densității maxime este obținut pentru un procent al conținutului de aer de aproximativ 5%, respectiv pentru o saturare de 90 - 95%.

Diversele tipuri de sol au capacități diferite de a absorbi apa, și astfel prezintă valori diferite ale conținutului de apă optim la compactare (fig.3.32). Pe măsură ce materialul devine din ce în ce mai puțin plastic, respectiv mai granular, relația dintre densitatea maxim obținută prin compactare și conținutul de apă se mută în sus și către stânga, cu valori crescute ale vârfului densității maxime. O excepție de la această tendință generală o prezintă nisipurile fine, cu o granulometrie constantă, la care între particulele de aceeași dimensiune rămân pori mari. În acest caz, creșterea densității maxim obținute prin testele de compactare este relativ mică, iar conținutul optim de apă este dificil de stabilit datorită proprietății de auto-drenare a acestui material.

Comportarea solurilor având diverse procente ale conținutului de apă, în timpul procesului de compactare, poate fi descrisă ca o expulzare a aerului din masa de material (Monahan, 1986). Având în vedere graficul de variație tipică prezentat în figura 3.33, se poate spune că pentru porțiunea crescătoare a curbei densității maxime (denumită și zonă de lubrifiere) aerul din porii materialului compactat este expulzat cu o rată mai mare decât creșterea în conținutul de apă. Cu toate acestea, considerând solul ca având o "permeabilitate a aerului", la un anumit nivel ridicat al conținutului de apă (reprezentat prin w_{opt}) aerul nu mai poate fi expulzat.

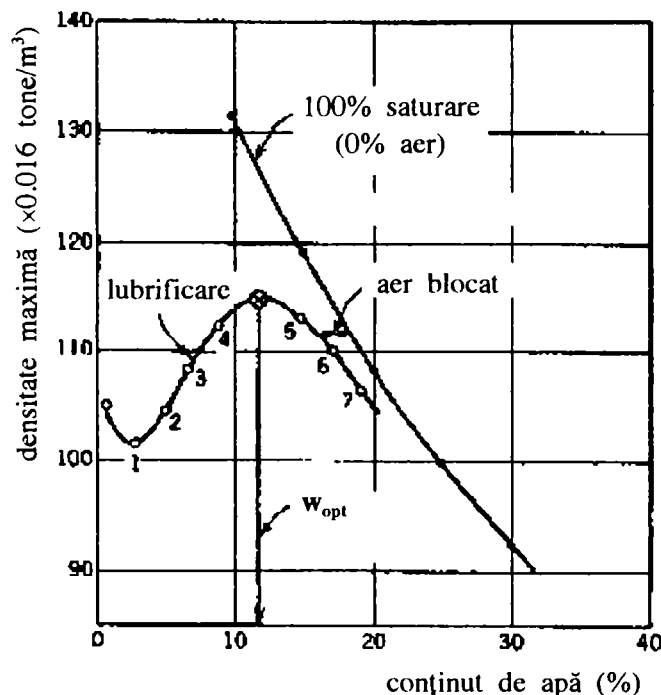


Figura 3.33 Efectul conținutului de apă asupra comportării solurilor supuse compactării (Monahan, 1986)

Începând din acest punct, aerul rămas în sol este sub forma unor bule închise, complet înconjurate de apă, și este ținut în poziția respectivă de către forțele de tensiune pe suprafața laterală (Scott, 1980). Aceste bule sunt din ce în ce mai greu de dislocat, o creștere a efortului de compactare determinând numai o creștere temporară a presiunii din pori, iar schimbările de volum permanente sunt din ce în ce mai reduse. Datorită acestui fenomen, saturarea completă nu se poate atinge numai prin compactare, pentru procente mai ridicate ale conținutului de apă curba densității desfășurându-se aproape paralel cu linia de saturație.

În ceea ce privește fenomenul care are loc pentru procente reduse ale conținutului de apă, între 0 și 5 %, când densitatea finală maximă descrește cu conținutul de apă, acesta se explică prin faptul că în sol se dezvoltă tensiuni datorate capilarității, care măresc rezistența materialului (Monahan, 1986). Pe măsură ce procentul conținutului de apă crește, peliculele capilare devin din ce în ce mai groase, apa acționând în continuare ca un lubrifiant între granulele de material.

Efectul de capilaritate depinde în principal (Wu et.al., 1984) de distribuția aerului și apei din porii materialului (reprezentată prin gradul de saturare S_r , sau prin procentul conținutului de apă w) și de dimensiunile granulelor (considerat prin intermediul lui D_{10} , dar este deasemenea afectat de către forma granulelor. În general, se consideră trei sisteme de bază apă - aer - granule (fig.3.34), ce sunt determinate de gradul de saturare al solului.

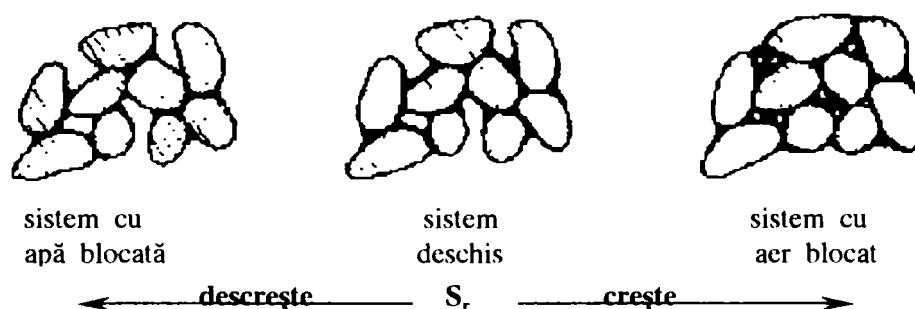


Figura 3.34 Sistemele de bază apă - aer - granule pentru sol nesaturat (Wu et.al., 1984)

În cazul sistemelor cu apă blocată sau cu aer blocat, gradul de saturare determină o continuitate a fazei gazoase, respectiv a celei lichide. În cazul sistemului deschis, nici faza gazoasă și nici cea lichidă nu sunt complet continue.

O explicație mai concisă a comportării solurilor supuse procesului de compactare, se poate da pe baza relației dintre densitatea maxim obținută, conținutul de apă și rezistența la tăiere (Parsons, 1992). Dacă tensiunile tăietoare dezvoltate în timpul procesului de compactare depășesc rezistența la tăiere a solului, o densificare a materialului va avea loc numai dacă acesta nu se află în apropierea condiției de saturare. În apropierea liniei

de saturare (0% aer) apa din sol preia o parte din tensiunile dezvoltate, generându-se o presiune suplimentară în pori.

Volumul materialului de compactat, reprezentat prin grosimea stratului depus, influențează deasemenea relația dintre densitatea maxim obținută și conținutul de apă (fig.3.35). O creștere a grosimii stratului de compactat conduce la o deplasare a curbei de legătură în jos și către dreapta, determinând valori reduse ale densității maxim obținute, respectiv valori crescute ale conținutului de apă optim pentru compactare.

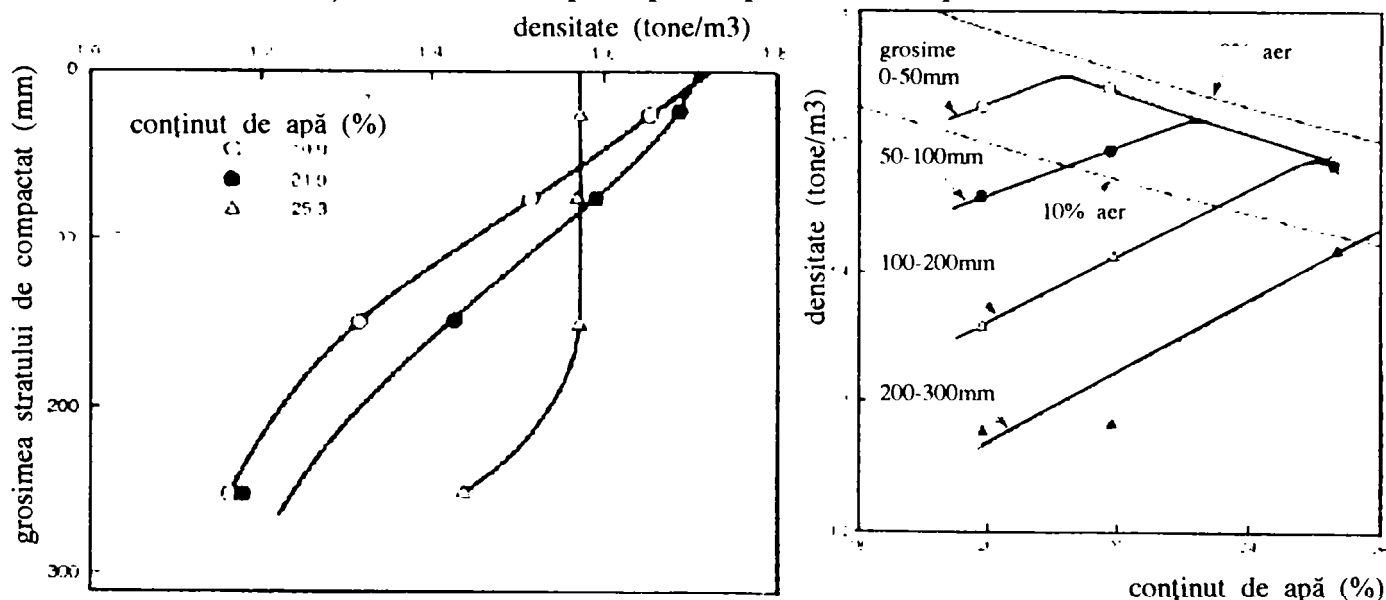


Figura 3.35 Influența grosimii stratului de compactat asupra relației densitate maxim obținută - conținut de apă (Parsons, 1992)

Având în vedere modul de comportare a solurilor supuse compactării, evidențiat prin graficele densitate maxim obținută - conținut de apă prezentate, se poate spune că în acest proces apar trei mărimi importante: vârful densității maxim obținute și conținutul de apă corespunzător acestuia (conținutul de apă optim pentru compactarea în condițiile de efort date), și conținutul de apă ce determină cea mai joasă valoare a densității maxim obținute. Acest procent redus al conținutului de apă, pentru care materialul prezintă cea mai ridicată rigiditate la compactare, corespunde așa numitului grad de saturare optim ($S_{r(opt)}$) la care modulul de rezistență la tăiere este maxim (vezi paragraful 3.4).

3.3.2 Efectul conținutului de apă în compactarea prin metode dinamice

Pe baza a numeroase teste *in-situ* de compactare cu cilindri vibrator (Johnson, 1960), s-a stabilit că energia consumată, ce are un efect foarte important asupra rezultatului procesului de compactare, este o funcție de următorii parametri: tipul și dimensiunile utilajului, înălțimea saltului cilindrului (deplasarea verticală), frecvența de vibrație, viteza de rulare, numărul trecerilor.

În figura 3.36 sunt prezentate relațiile tipice dintre densitatea maximă și

conținutul de apă, trasate pentru cele două cazuri distincte din punctul de vedere al tipului de energie dezvoltată: cu și, respectiv, fără vibrația cilindrului.

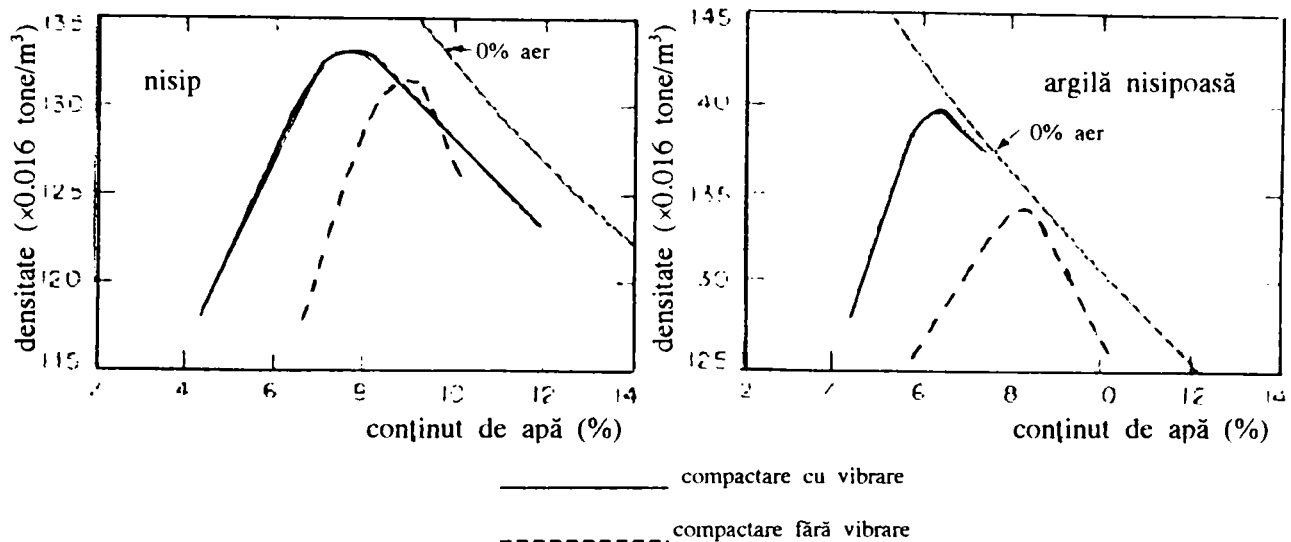


Figura 3.36 Relația densitate maximă - conținut de apă în compactarea dinamică in-situ (Johnson, Sallberg, 1960)

Curbele din figura 3.36 reprezintă rezultatele compactării unui strat de 22 cm de material depus, după 32 de treceri cu un utilaj de 2.7 tone. Se poate observa că prin aplicarea vibrațiilor, densitatea specifică obținută este mai mare decât în cazul compactării statice, pentru ambele tipuri de sol. În urma diverselor teste s-a constatat că diferența dintre densitatea maxim obținută prin compactarea dinamică și cea obținută prin compactarea statică depinde foarte mult de tipul utilajului.

În figura 3.37 este prezentată o relație tipică de legătură densitate maximă - conținut de apă stabilită prin teste de compactare în laborator, atât cu, cât și fără, aplicarea vibrațiilor.

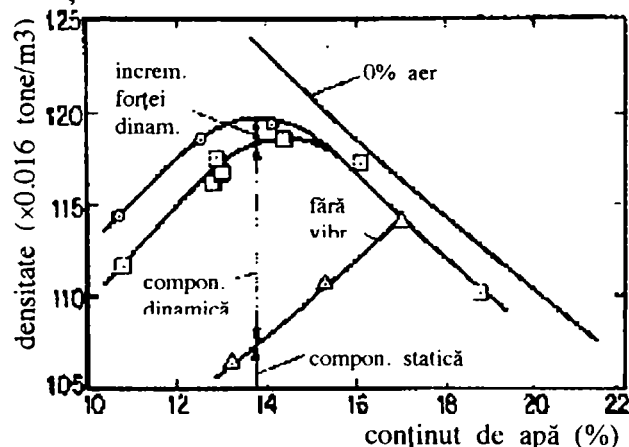


Figura 3.37 Relația densitate maximă - conținut de apă obținută prin teste de laborator (Selig, Yoo, 1977)

Pe baza acestor rezultate s-a concluzionat deasemenea că suprapunerea vibrațiilor mărește semnificativ gradul de compactare.

Având în vedere forma curbelor densitate – conținut de apă trasate, se poate considera că întreaga compactare atinsă este formată din două

componente: cea statică, produsă prin operarea fără vibrații, și cea dinamică, care corespunde situației cu vibrații.

Din rezultatele ambelor tipuri de teste (in-situ sau de laborator), se observă că, în cazul compactării cu vibrare, vârful densității maxim obținute se atinge pentru procente ale conținutului de apă (w_{opt}) mai mici decât în cazul compactării fără vibrații. Prin creșterea forței dinamice generate, w_{opt} tinde să scadă.

Relațiile generale ale densității maxime obținute și rigidității atinse, cu conținutul de apă al materialului compactat, sunt prezentate în figura 3.38. Mărind efortul de compactare aplicat, densitatea maxim obținută crește, iar procentul w_{opt} scade. Aceasta arată că parametrii considerați nu sunt doar funcții de proprietățile materialului compactat, ci în același timp depind și de metoda de compactare.

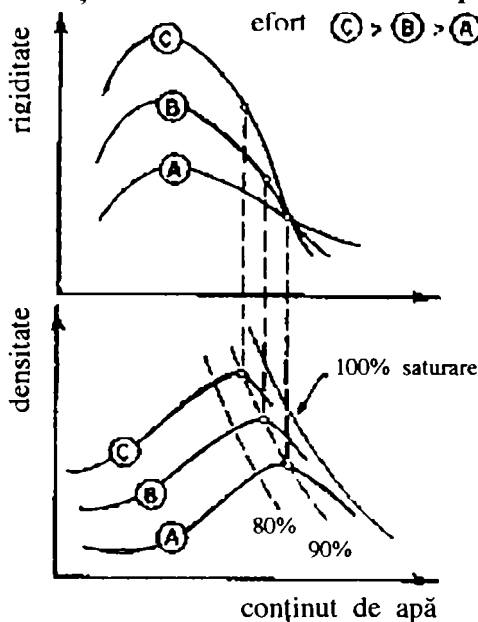


Figura 3.38 Relațiile generale ale densității și rigidității cu conținutul de apă (Selig, 1982)

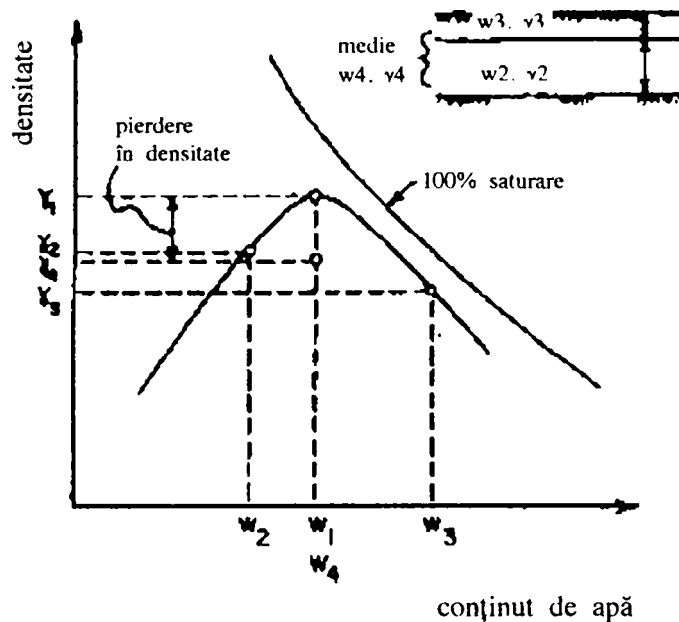


Figura 3.39 Densitatea maximă în cazul distribuției neomogene a conținutului de apă în strat

Relațiile de legătură prezentate în figura 3.38 sunt reprezentative pentru majoritatea tipurilor de sol, dar pot fi considerate valabile numai atunci când conținutul de apă din sol rămâne la același nivel de-a lungul procesului de compactare. Procentul conținutului de apă al materialului depus, care apare ca rezultat al factorilor mediului înconjurător, poate fi foarte diferit față de valoarea considerată inițial pentru desfășurarea lucrărilor. Totodată, acest procent real poate varia în timp ca urmare a modificării factorilor de mediu. În această situație, rezultatul compactării (dat prin intermediul densității și rigidității obținute) va fi alterat față de cel estimat inițial, această diferență depinzând de mărimea schimbărilor în procentul conținutului de apă și de relația față de conținutul de apă optim pentru compactare.

Printre factorii care influențează rezultatul compactării in-situ, se menționează și metoda de pregătire a materialului de compactat. Acest

factor include modul de excavare, transport și punere în operă (împrăștiere) a materialului de compactat, adăugarea sau drenarea acestuia. O compoziție și un conținut de apă omogene a stratului de compactat sunt foarte importante. Dacă umiditatea nu este dispersată corespunzător în material, chiar dacă efortul de compactare și procentul mediu al conținutului de apă per strat sunt corecte, rezultatul în ceea ce privește densitatea obținută a materialului nu va fi satisfăcătoare (fig.3.39).

În figura 3.40 sunt prezentate mai multe relații densitate obținută - conținut de apă (Parsons, 1992), stabilite pentru un nisip cu granulometrie uniformă și pentru o argilă nisipoasă (ambele materiale fiind puse în operă), compactate dinamic cu cilindri vibrator netezi. Relațiile au fost determinate pentru diverse tipuri de utilaje (cu diverse mase), și după un număr de treceri diferit. Pentru uniformizarea rezultatelor, densitatea obținută este exprimată relativ la rezultatul unor teste de compactare cu un ciocan de 2.5 kg (test Proctor standard), iar conținutul de apă este exprimat ca diferență față de procentul optim w_{opt} stabilit prin testele respective.

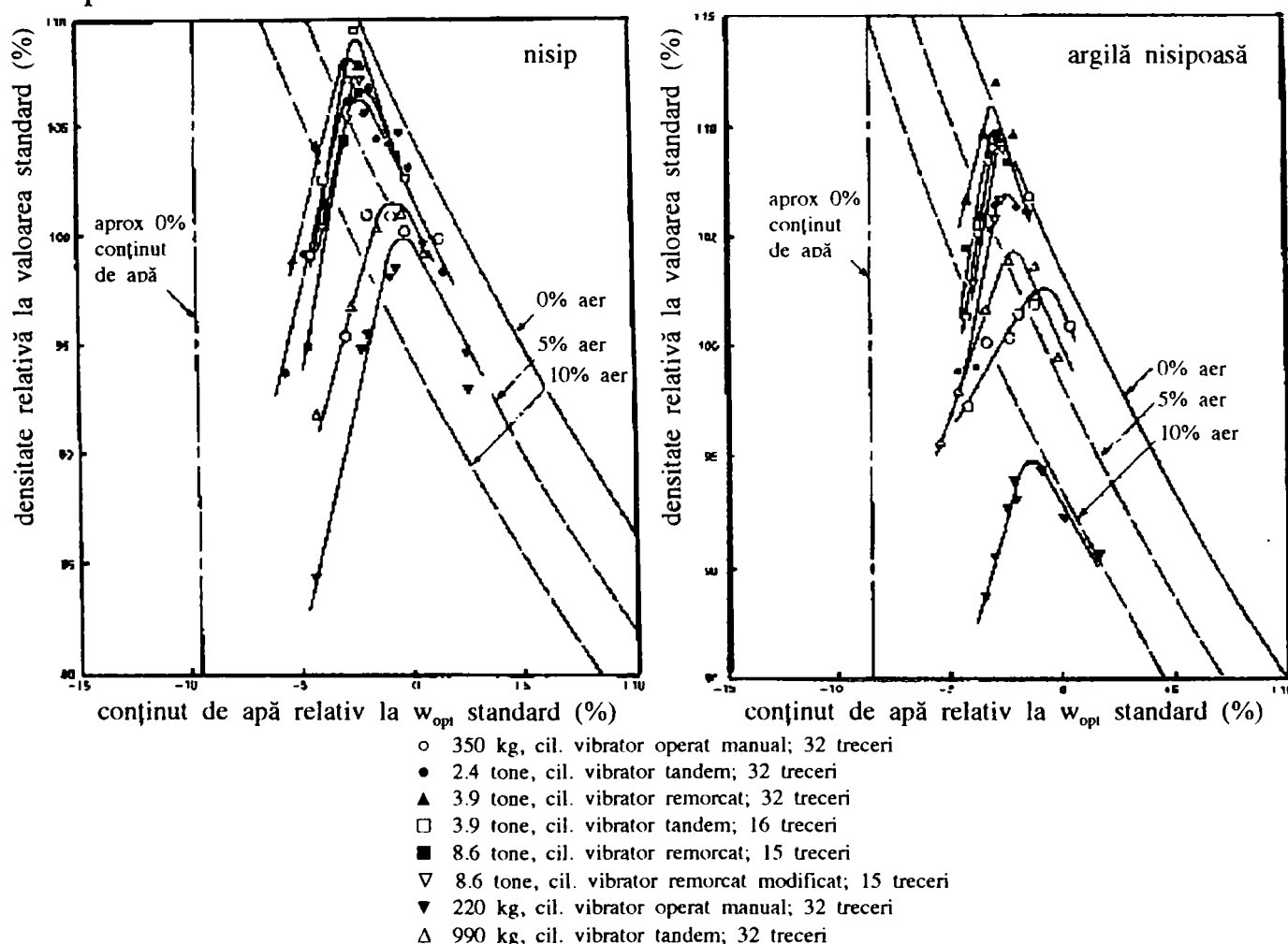


Figura 3.40 Rezultatele compactării cu cilindri vibrator netezi (grosimea stratului depus 150 mm)

Raportând densitățile obținute și conținutul de apă optim pentru compactare la masa specifică a cilindrului vibrator (masă / unitate de

lățime a cilindrului), s-au obținut următoarele ecuații cu coeficienții de corelare corespunzători (Parsons, 1992):

pentru nisipul cu granulometrie uniformă

$$w = 17.7m^{-101} - 10 \quad \text{cu un coeficient de corelare de 0.85,}$$

iar pentru argila nisipoasă

$$w = 14.7m^{-087} - 10 \quad \text{cu un coeficient de corelare de 0.82,}$$

unde

w reprezintă diferența dintre conținutul de apă stabilit pentru compactare și w_{opt} obținut prin teste Proctor standard;

m este masa specifică (per lățime efectivă de cilindru, kg/m).

Studiind relația dintre gradul de compactare atins și numărul de treceri, s-au obținut următoarele ecuații cu coeficienții de corelare corespunzători (Parsons, 1992):

pentru nisipul cu granulometrie uniformă

a. $P = 3.44 - 0.993m - 0.232w$, cu un coeficient de corelare de 0.91,

b. $P = 3.74 - 1.09m - 0.35w$, cu un coeficient de corelare de 0.90,

iar pentru argila nisipoasă

a. $P = 2.14 - 0.613m - 0.207w$, cu un coeficient de corelare de 0.90,

b. $P = 3.27 - 1.12m - 0.423w$, cu un coeficient de corelare de 0.92,

unde

a și **b** indică modul de specificare al nivelului de compactare necesar a fi obținut, **a** pentru un necesar de 95% din densitatea maximă atinsă prin testul Proctor standard, iar **b** pentru un maxim de 10% conținut de aer admis;

P este \log_{10} din numărul necesar de treceri;

m este \log_{10} din masa specifică (în kg/m);

w este conținutul de apă dat prin diferența față de w_{opt} stabilit prin testul Proctor standard (în %).

Numeroasele rezultate ale testelor de compactare, prezentate în literatura de specialitate prin relația de legătură dintre densitatea maxim obținută și conținutul de apă al materialului, dovedesc efectul major determinat de acest factor asupra gradului de compactare atins pentru materialele granulare puse în operă. Cu toate acestea, literatura nu oferă suficiente informații pentru a dezvolta ecuații generale care să permită prevederea unor rezultate practice ale procesului compactării cu cilindrul vibrator. Se pare că aceasta este o consecință a complexității fenomenului compactării dinamice, ce implică diverși factori.

Pe baza unei mari cantități de rezultate date de teste in-situ, au fost stabilite anumite ecuații de corelare (Parsons, 1992) care, în condițiile unui anumit tip de utilaj și în funcție de conținutul de apă al materialului de compactat, indică numărul de treceri pentru necesar pentru a atinge un

nivelul de compactare cerut. Din nefericire, chiar dacă aceste ecuații se bazează pe teste desfășurate cu diverse tipuri de cilindri vibrator, se pare că lipsa informațiilor suficient de detaliate face ca aplicarea lor să fie neclară și deci nesigură.

3.4 Caracteristici dinamice ale nisipurilor

Cele mai importante proprietăți ale solurilor ce se consideră 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 tensiune de tăiere – deformație specifică care apare în cazul unei solicitări dinamice, este prezentată în figura 3.41. 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 .

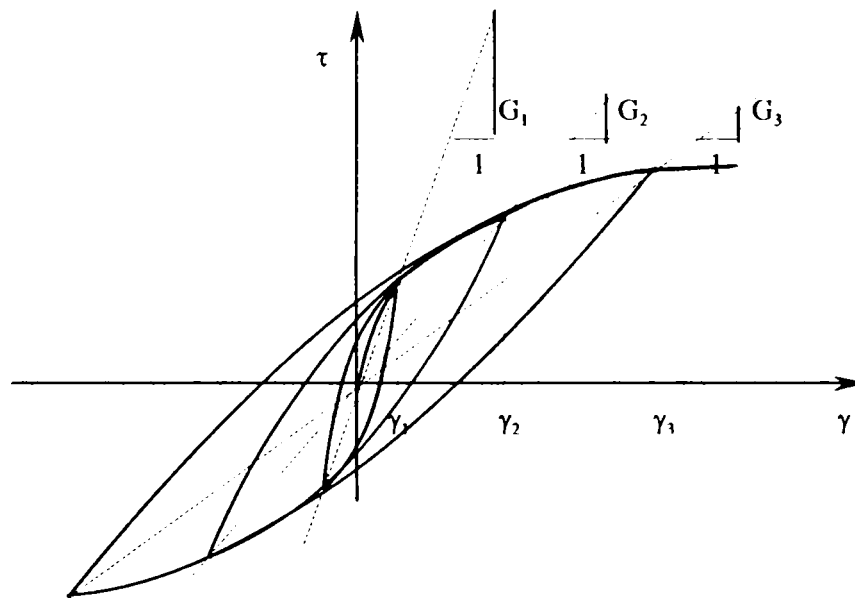
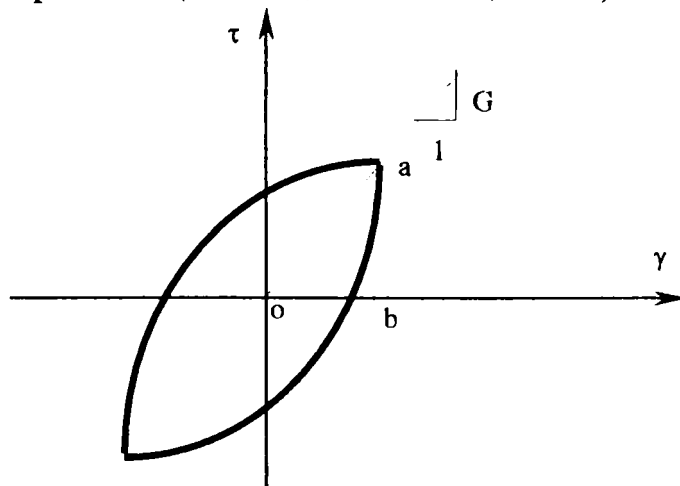


Figura 3.41 Relația tensiune tăietoare – deformație specifică pentru solicitarea dinamică

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 (Hardin, Drnevich, 1971).



$$G = \text{arctg} \frac{ab}{ob} \quad (3.26)$$

$$D = \frac{A_{loop}}{4\pi A_{abo}} \quad (3.27)$$

Figura 3.42 Definierea modulului de rezistență la tăiere și a raportului de vâscozitate

Având în vedere că bucla histeretică este determinată de o anumită magnitudine a deformației specifice la tăiere γ , înseamnă că modulul de rezistență la tăiere G și raportul de vâscozitate D sunt funcții de deformația specifică impusă de tăiere (fig.3.43).

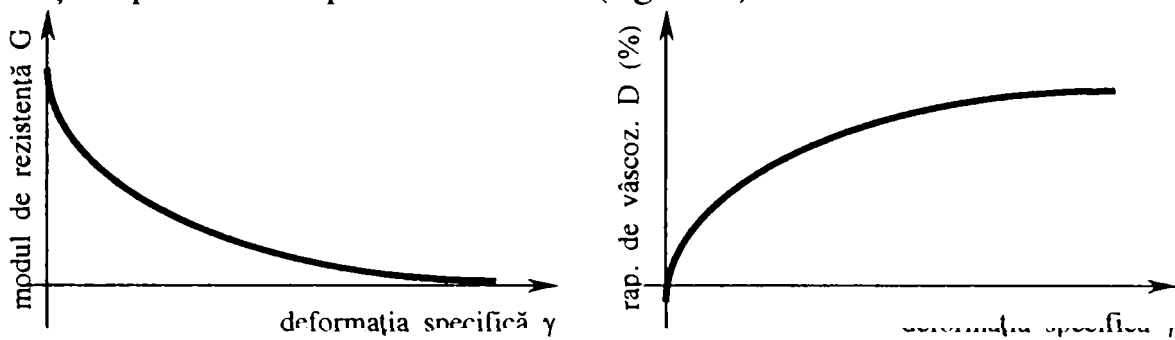


Figura 3.43 Variația modului de rezistență și a raportului de vâscozitate cu deformația specifică

În practică există mai multe metode de laborator sau de teren pentru determinarea modului de rezistență și a raportului de vâscozitate. Principalele procedee pot fi enumerate după cum urmează:

- Determinarea directă în laborator a relației tensiune deformație specifică, fie prin intermediul testelor de compresiune triaxială, fie prin teste de tăiere simplă sau la torsiune, desfășurate printr-o încărcare ciclică. Această metodă se aplică în cazul deformațiilor specifice la tăiere cu valori medii până la ridicate (între 10^{-2} % și 5%).
- Prin teste de laborator cu vibrație forțată, care presupune determinarea frecvenței de rezonanță și măsurarea răspunsului materialului pentru alte valori ale frecvenței. Aceste teste sunt realizate prin aplicarea unor vibrații longitudinale sau de torsiune (testul coloanei rezonante) asupra unor epruvete cilindrice, sau prin aplicarea unor vibrații de tăiere asupra unor epruvete plasate pe o masă vibrantă. Metoda se consideră pentru determinarea lui G și D corespunzătoare deformațiilor specifice cu valori de la joase la medii (între 10^{-4} % și 10^{-2} %).
- Prin teste de laborator cu vibrație liberă, longitudinală sau torsională, ceea ce presupune măsurarea răspunsului descrescător al epruvetei. Această metodă este considerată în cazul deformațiilor specifice cu valori de la joase la moderat ridicate (între 10^{-3} % și 1%).
- Prin măsurarea în teren a vitezelor de propagare a undelor longitudinale, de tăiere și Rayleigh. Această metodă se consideră pentru deformații specifice cu valori joase (5×10^{-4} %), și nu furnizează valori pentru raportul de vâscozitate.

Prin intermediul acestor teste se stabilește viteza v_s de propagare a undelor tăietoare (sau secundare), iar modulul de rezistență maxim depinde direct de această mărime prin intermediul expresiei următoare:

$$G_o = \rho v_s^2 \quad (3.28)$$

unde ρ este densitatea materialului.

Diverși cercetători au studiat efectul mai multor parametrii asupra caracteristicilor dinamice ale solurilor, iar pe baza rezultatelor obținute în urma efectuării a numeroase teste, au propus expresii empirice pentru estimarea modulului de rezistență G și a raportului de vâscozitate D . Se menționează că rezultatele testelor efectuate sunt în bună concordanță de la un cercetător la altul.

În urma studierii fenomenului încărcării dinamice a materialelor granulare, Hardin și Drnevich (1971) au stabilit că factorii ce afectează în mod deosebit modulul de rezistență la tăiere sunt:

- amplitudinea deformației specifice de tăiere γ ,
- tensiunea principală efectivă medie $\sigma'_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$;
- indicele porilor e ;
- numărul ciclurilor de încărcare N ;
- conținutul de apă w (sau gradul de saturare S_r).

Factori mai puțin importanți ar fi tensiunea tăietoare octoedrică, raportul de supraconsolidare OCR, coeziunea c' și unghiul frecării interioare ϕ' efective, și timpul de încărcare.

Astfel, *Hardin și Drnevich (1971)* au propus următoarea expresie:

$$G_o = 3229.71 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{1/2} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (3.29)$$

în care a reprezintă un parametru ce depinde de indicele de plasticitate (și deci în cazul nisipurilor $a = 0$).

Pentru o valoare curentă γ a deformației specifice, modulul de rezistență la tăiere și raportul de vâscozitate se pot calcula:

$$G = G_o \frac{\gamma_r}{\gamma_r + \gamma} \quad \text{și} \quad D = D_{\max} \frac{\gamma}{\gamma_r + \gamma} \quad (3.30, 3.31)$$

unde

$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_o}$ reprezintă deformația specifică de referință;

$\tau_{\max} = \frac{\sigma'_v}{2} \sqrt{(1 + K_o)^2 \sin^2 \phi' - (1 - K_o)^2}$ este tensiunea tangențială maximă;

$K_o = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_v}$ este coeficientul tensiunii laterale (faza acțiunii statice);

σ'_v este tensiunea verticală efectivă;

σ'_c este tensiunea laterală efectivă;

$D_{\max} = D_o - 1.5 \lg N$ (%) este raportul de vâscozitate maxim, corespunzător unor deformații specifice foarte mari. D_o este aproximativ 33% în cazul unui nisip uscat și curat, și aproximativ 28% pentru cazul unui nisip saturat (Hardin, Drnevich, 1972).

Întrucât pe baza măsurărilor efectuate în cadrul testelor cu coloana la rezonanță s-a stabilit că, pentru valori ale deformației specifice la tăiere

mai joase decât 0.25×10^{-4} radiani, modulul de rezistență este practic constant și egal cu valoarea maximă G_o , se acceptă ca deformația specifică de referință γ_r să fie considerată 10^{-6} radiani.

Curba formată de punctele de tensiune tangențială maximă din figura 3.41 (partea superioară a buclelor consecutive) reprezintă relația ipotetică tensiune – deformație specifică, aceasta putând defini modulul de rezistență la tăiere ca funcție de deformația specifică (fig.3.44).

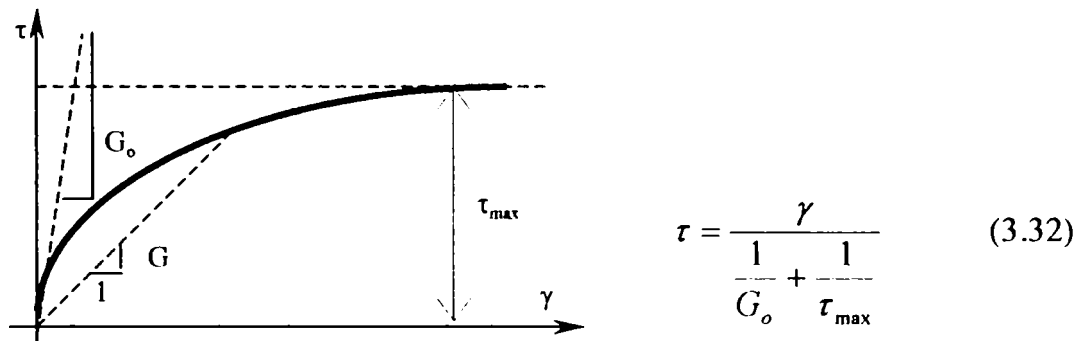


Figura 3.44 Curba ipotetică tensiune – deformație specifică

Se poate scrie următoarea relație de legătură dintre modulul de rezistență și raportul de vâscozitate:

$$D = D_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_o}\right) \quad (3.33)$$

Pe baza încercărilor a fost pus în evidență (Hardin, Drnevich, 1972) modul în care modulul de rezistență la tăiere al nisipurilor este influențat de către presiunea înconjurătoare, amplitudinea deformațiilor specifice și indicele porilor. S-a stabilit că în general modulul de rezistență poate fi estimat prin intermediul următoarei expresii empirice:

$$G = 218.81 K_1 \sqrt{\sigma'_m} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (3.34)$$

în care K_1 este un parametru determinat de amplitudinea deformațiilor specifice și indicele porilor (fig.3.45).

Din variațiile prezentate se poate observa că:

pentru deformații specifice foarte joase ($\gamma \leq 10^{-3} \%$) parametrul K_1 depinde numai de indicele porilor e ;

pentru valori intermediare ale deformației specifice (între $10^{-3} \%$ și $10^{-1} \%$) variația parametrului K_1 cu deformația specifică este numai ușor influențată de presiunea verticală, de unghiul de frecare interioară și de coeficientul K_o , dar este încă puternic influențată de indicele porilor e ;

pentru valori ridicate ale deformației specifice ($\gamma > 10^{-1} \%$), valoarea lui K_1 este ușor influențată de presiunea verticală, și este independentă de coeficientul K_o , de unghiul de frecare interioară și de indicele porilor.

În figura 3.46 este prezentată variația cu deformația specifică la tăiere a raportului $G(\gamma) / G(10^{-4} \%)$, dintre modulul de rezistență corespunzător unei

deformații specifice curente și modulul de rezistență corespunzător unei deformații specifice de 10^{-4} %. Considerând fâșia indicată în această figură, o aproximare bună a relației $G - \gamma$, pentru orice tip de nisip, poate fi obținută prin determinarea modulului de rezistență corespunzător unei deformații specifice foarte joase (G_0), iar apoi reducând această valoare pentru alte valori γ cu ajutorul liniei întrerupte a graficului.

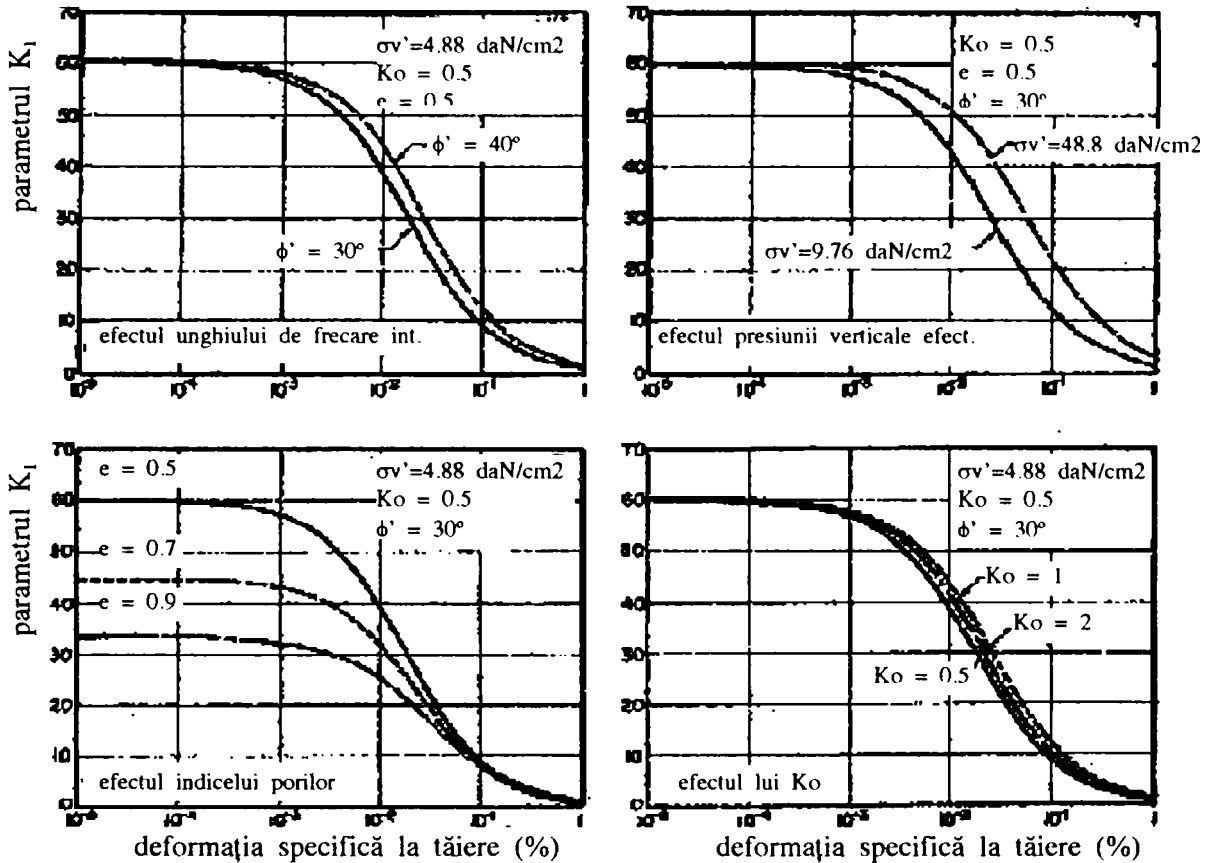


Figura 3.45 Influența diverșilor factori asupra parametrului K_1 , în cazul nisipurilor (Hardin, Drnevich, 1972)

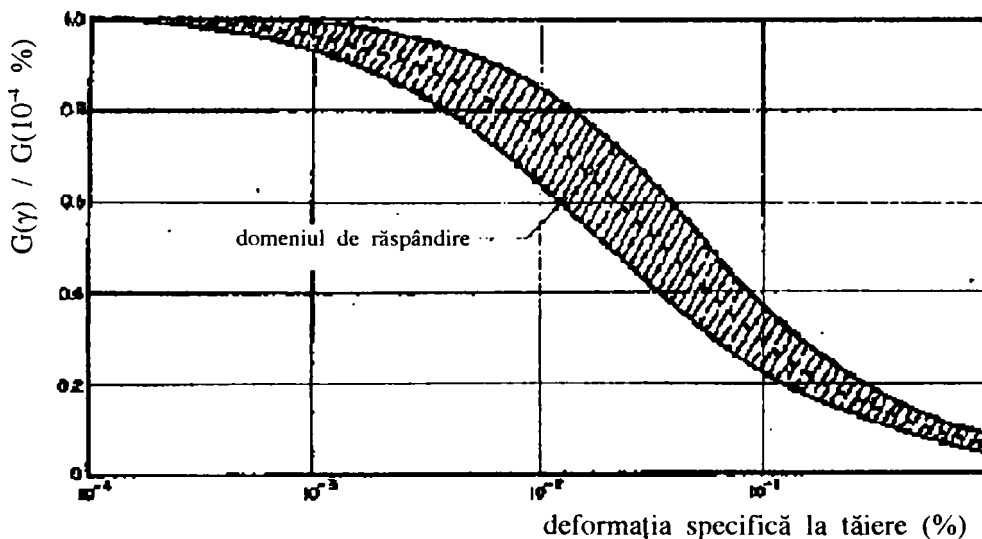


Figura 3.46 Variația modulului de rezistență la tăiere cu deformația specifică, în cazul nisipurilor (Hardin, Drnevich, 1972)

În ceea ce privește raportul de vâscozitate al nisipurilor, în urma testelor efectuate (Hardin, Drnevich, 1972), s-a observat că cei mai importanți

factori care îl influențează sunt deformația specifică, tensiunea principală medie, indicele porilor și numărul ciclurilor de încărcare (fig.3.47). Alți factori, cum ar fi unghiul de frecare interioară și conținutul de apă au o influență redusă.

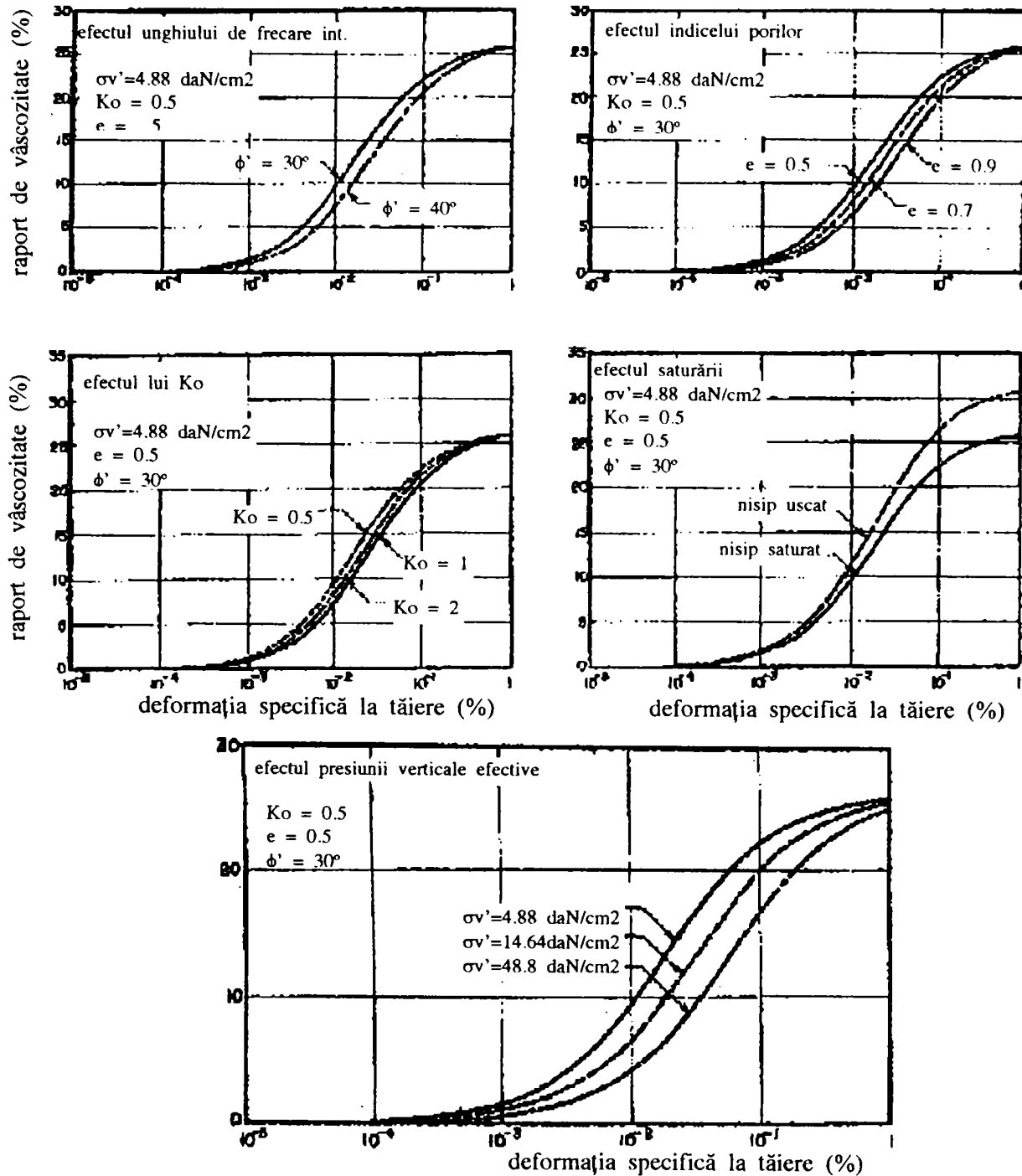


Figura 3.47 Influența diversilor factori asupra raportului de vâscozitate, în cazul nisipurilor saturate (Hardin, Drnevich, 1972)

În numeroase teste cu coloana la rezonanță efectuate pentru mai multe tipuri de nisipuri, Edil și Luh (1978) au luat în considerare următorii parametri: amplitudinea deformației specifice la tăiere γ , tensiunea principală medie σ'_m , diferența tensiunilor principale $\sigma_1 - \sigma_3$, numărul ciclurilor de încărcare N , indicele porilor e , densitatea relativă I_D , granulometria (prin intermediul coeficientului de uniformitate) C_u , caracteristicile granulelor (mărime, formă, natura suprafeței). Variațiile

tipice obținute pentru modulul de rezistență și pentru raportul de vâscozitate, în diverse condiții ale indicelui e și a tensiunii σ'_m , sunt prezentate în figura 3.48. Valoarea modulului de rezistență corespunzătoare deformației specifice de 0.25×10^{-4} radiani este considerată ca modul de referință (maxim) G_o , iar ca raport de vâscozitate de referință D_o se consideră cel corespunzător pentru 1000 de cicluri de încărcare.

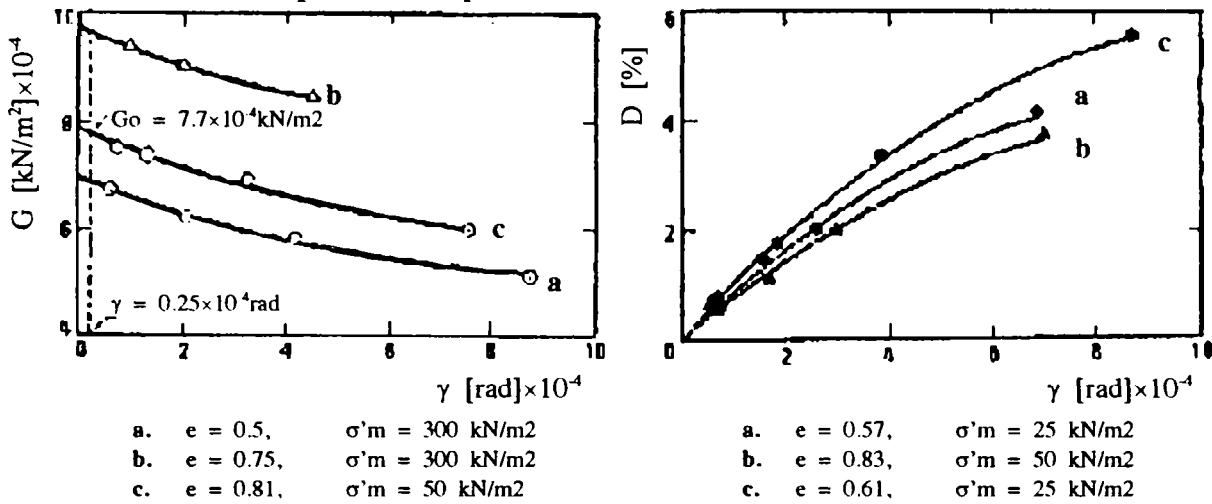


Figura 3.48 Variațiile modulului de rezistență și raportului de vâscozitate cu deformația specifică (Edil, Luh, 1978)

Rezultatele indică faptul că parametrii cu cel mai important efect asupra lui G și D sunt tensiunea principală medie, starea densității (indicată prin indicele porilor sau prin densitatea relativă), și mărimea deformației specifice. Efectul celorlalți parametri considerați ($\sigma_1 - \sigma_3$, C_u , mărimea granulelor) a rezultat relativ neimportant. Numărul ciclurilor de încărcare are o oarecare influență asupra raportului de vâscozitate, iar forma granulelor (dată printr-un indice R) influențează modulul de rezistență.

În urma unei analize statistice a rezultatelor, Edil și Luh au stabilit următoarele ecuații empirice:

$$\frac{G}{G_o} = 1.004 - 345.4\gamma \tag{3.35}$$

și
$$G_o = \left[0.769 + (2.793 - 2.195e) \ln\left(\frac{\sigma'_m}{98.07} + 1\right) - 0.801R \right] \times 10^5 \tag{3.36}$$

sau
$$G_o = \left[-5.899 + 0.305 \exp(I_D) \sigma'_m \frac{1}{2} + 4.02 \sigma'_m \frac{1}{4} \right] \times 10^4 \tag{3.36'}$$

în care G , G_o și σ'_m sunt în kN/m^2 , iar γ în radiani;

$$\frac{D}{D_o} = 1.131 - 0.0453 \log N \tag{3.37}$$

și
$$D_o = 0.88 + 6592\gamma e^{\frac{1}{2}} - 0.28\gamma^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma'_m}{98.07}\right)^3 - 73.55\gamma \sigma'_m \frac{1}{2} \tag{3.38}$$

sau
$$D_o = 0.7 + 7800\gamma I_D \frac{1}{2} - 0.36\gamma^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma'_m}{98.07}\right)^3 \tag{3.38'}$$

în care D și D_o sunt în procente.

Wu, Gray și Richart jr., au studiat efectul capilarității (dată prin gradul de saturare) asupra modului de rezistență la tăiere G_o pentru câteva tipuri de materiale granulare fine necoezive, atât în cazul deformațiilor specifice la tăiere joase (maxim 10^{-3} %) cât și în cazul deformațiilor specifice mari (până la 0.25 %). Rezultatele testelor efectuate cu metoda coloanei la rezonanță în condițiile deformațiilor specifice joase (1984), au arătat o variație clară a lui G_o în funcție de gradul de saturare S_r și presiunea efectivă σ'_m (fig.3.49).

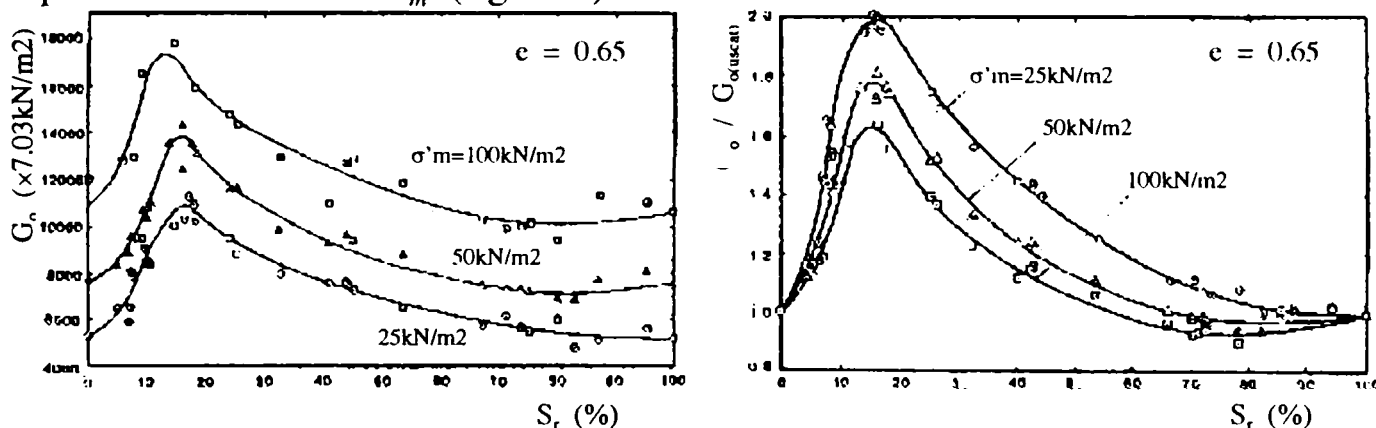


Figura 3.49 Variația modului de rezistență cu gradul de saturare și presiunea efectivă, în cazul deformațiilor specifice joase (Wu, Gray, Richart jr., 1984)

Valoarea maximă a raportului dintre modulul de rezistență G_o și modulul de rezistență corespunzător stării uscate a materialului granular $G_{o(uscata)}$ este dată ca o funcție de mărimea granulelor (caracterizată de D_{10}) și presiunea efectivă (fig.3.50).

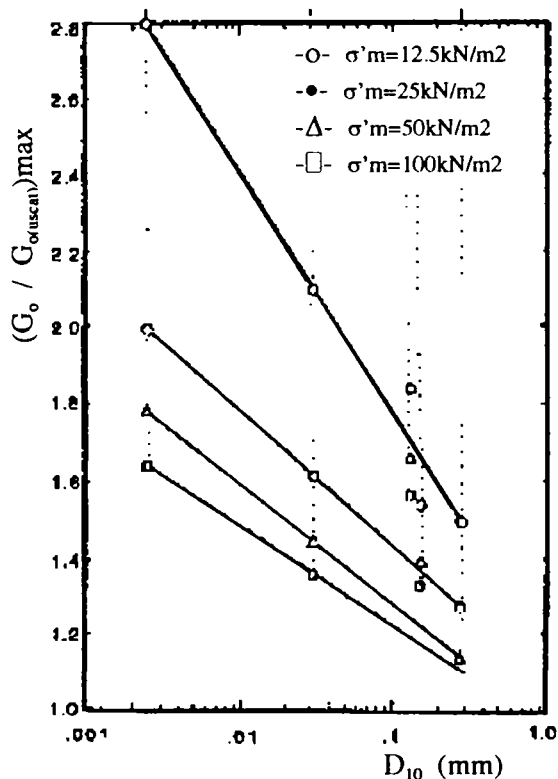


Figura 3.50 Valorile maxime ale raportului dintre G_o și $G_{o(uscata)}$ în raport cu mărimea granulelor

Din rezultatele testelor se observă că vârful modulului de rezistență la tăiere are loc pentru un grad de saturare cuprins între 5 și 20 %, definit ca grad de saturare optim. Pentru estimarea gradului de saturare optim se propune următoarea relație:

$$S_{r(opt)} = -6.5 \lg(D_{10}) + 1.5 \quad (3.39)$$

Deasemenea, din graficele prezentate, se observă că în cazul celei mai joase presiuni efective, valoarea maximă a modulului de rezistență G_o este de aproximativ două ori mai mare decât valoarea corespunzătoare stării uscate $G_{o(uscat)}$, și chiar pentru cea mai ridicată valoare considerată a presiunii, G_o este încă de aproximativ 1.6 ori mai mare decât $G_{o(uscat)}$. Efectul conținutului de apă este cel mai evident pentru cazul presiunii efective joase, iar apoi descrește pe măsură ce presiunea este mărită. Pentru un grad de saturare al materialului granular de 100 %, modulul de rezistență G_o prezintă o valoare egală cu cea corespunzătoare stării uscate.

Pe baza rezultatelor testelor desfășurate, *Wu, Gray și Richart (1984)* au stabilit următoarele relații prin care se poate obține modulul de rezistență corespunzător unui grad de saturare curent:

$$G_o = (1 + H)G_{o(dry)} \quad (3.40)$$

în care

$$H = (a - 1)H_1H_2 \quad (3.41)$$

este o funcție de gradul de saturare, cu

$$H_1 = 1 \text{ și } H_2 = \sin\left(\frac{\pi S_r}{2S_{r(opt)}}\right) \text{ pentru } S_r \leq S_{r(opt)} \quad (3.42')$$

$$H_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{100 - S_r}{100 - S_{r(opt)}} \right)^2 \text{ și } H_2 = \sin \left[\frac{\pi(S_r + 50 - \frac{3}{2}S_{r(opt)})}{100 - S_{r(opt)}} \right] + 1 \text{ pentru } S_r > S_{r(opt)} \quad (3.42'')$$

Parametrul $a = \left(\frac{G_o}{G_{o(dry)}} \right)_{\max}$ se estimează pe baza graficului din figura 3.50.

În figura 3.51 se prezintă rezultatele mai multor teste cu coloana la rezonanță pentru cazul deformațiilor specifice la tăiere relativ mari (până la 0.25 %), realizate în condițiile a două niveluri ale presiunii efective (25, respectiv 100 kN/m²) și a zece valori pentru gradul de saturare (Wu, Gray, Richart jr., 1985). Efectul gradului de saturare este evident pentru ambele niveluri ale presiunii efective, și este similar cu cel dovedit în cazul deformațiilor specifice de amplitudine foarte joasă. Totuși, pentru situația deformațiilor specifice cel mai ridicate și în cazul unei presiuni efective joase, efectul conținutului de apă este aproape neglijabil.

În același timp, se observă că în cazul amplitudinilor mari ale deformației specifice, modulul de rezistență corespunzător materialului în stare saturată

este mai mic decât valoarea corespunzătoare stării complet uscate. Aceasta poate fi o consecință a faptului că presiunea din porii epruvetei sporește.

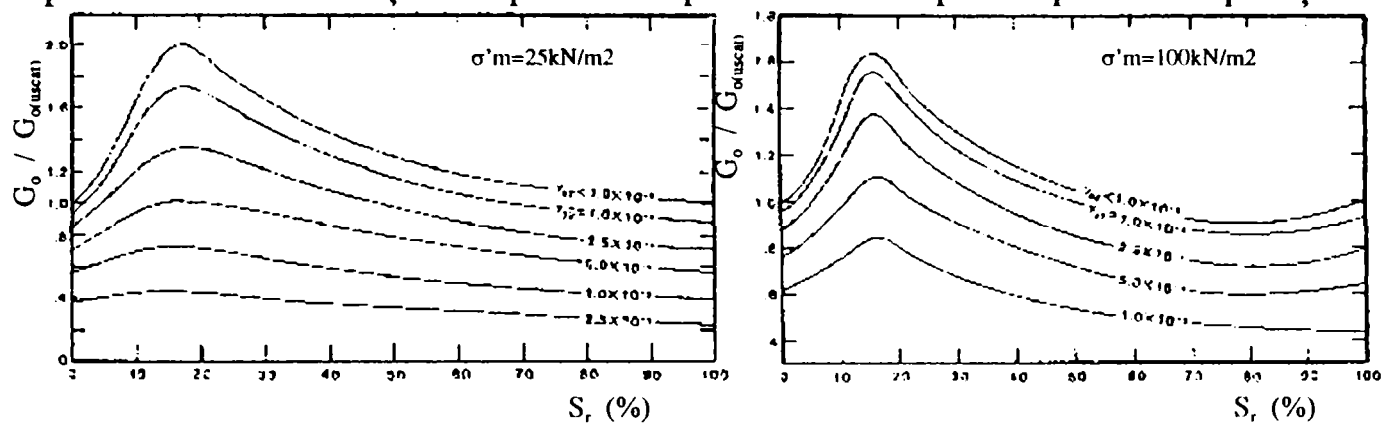


Figura 3.51 Variația raportului dintre G_o și $G_{o(uscat)}$ cu gradul de saturare și deformația specifică, în cazul deformațiilor specifice joase (Wu, Gray, Richart jr., 1985)

Datele furnizate de către cercetătorii menționați în acest paragraf pot servi ca un ghid foarte util în studiul proprietăților dinamice ale nisipurilor. Corespunzător, ecuațiile propuse de aceștia oferă posibilitatea unei bune estimări a modulului de rezistență la tăiere. Totuși, având în vedere însăși varietatea modurilor de estimare dezvoltate, este clar că sunt necesare mai multe informații referitoare la influența produsă de către diverșii parametrii.

Capitolul 4

DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ LA TĂIERE DINAMICĂ

Acest capitol prezintă testele de laborator efectuate pentru a studia una dintre cele mai importante caracteristici dinamice ale materialelor granulare, și anume modulul de rezistență la tăiere corespunzător deformațiilor specifice foarte mici. Scopul principal al testelor este acela de a determina comportarea modulului de rezistență maxim G_o relativ la conținutul de apă, în cazul acțiunii dinamice. În afară de conținutul de apă, în studiu au fost deasemenea considerate densitatea și frecvența de oscilație.

Testele au fost desfășurate cu ajutorul unui dispozitiv de Vibrare prin Torsiune Liberă, pentru cinci niveluri ale conținutului de apă, de la starea complet uscată (0 %) până la procentul conținutului de apă optim la compactare (w_{opt} , stabilit prin testul Proctor standard). Au fost dispuse două trepte ale densității efective a materialului testat, una corespunzătoare unui grad ridicat de compactare (cerut în general prin standarde pentru lucrări de compactare de calitate), iar cea de-a doua corespunzătoare unei stări relaxate a materialului pus în operă (care există în mod obișnuit la începutul unei lucrări de compactare). Epruvetele pregătite în condițiile menționate au fost vibrare prin torsiune liberă, în trei secvențe succesive diferite. Prima treaptă de încărcare dinamică a fost aplicată fără dispunerea de greutate suplimentare pe brațul de acționare al dispozitivului vibrator, pentru cea de-a doua treaptă pe braț au fost dispuse simetric două greutăți de câte 5 kg, iar pentru cea de-a treia două greutăți de câte 10 kg. Având în vedere că frecvența de vibrație a sistemului liber depinde de masa de încărcare, înseamnă că fiecare epruvetă a fost acționată dinamic cu trei frecvențe de vibrație succesive, de la cea ridicată la cea scăzută.

Caracteristicile generale ale materialului granular considerat, un nisip prăfos uniform gradat, necesare pentru pregătirea testelor și apoi pentru prelucrarea și interpretarea rezultatelor, sunt prezentate în primul paragraf. Comportarea la compactare a materialului a fost stabilită printr-o serie de teste Proctor standard.

Cel de-al doi-lea paragraf prezintă procedurile de preparare a epruvetelor, împreună cu parametrii obținuți pentru acestea, precum și procedura generală aplicată la efectuarea testelor de Vibrare prin Torsiune Liberă.

Cel de-al trei-lea paragraf al acestui capitol prezintă modul de interpretare a rezultatelor măsurate pe parcursul testelor. Pe baza ciclogramei deplasare relativă - timp, au fost determinate perioada de oscilație, raportul de

vâscozitate și frecvența naturală de vibrație. Modulul de rezistență maxim la tăiere a fost apoi determinat cu ajutorul relației 3.28, $G_o = \rho v_s^2$, dar întrucât densitatea ρ și viteza secundară v_s sunt determinate de către parametrii considerați în teste (conținut de apă, densitate efectivă, frecvență naturală de vibrație), modulul de rezistență la tăiere căutat s-a obținut ca o funcție $G_o = f(w, \rho', f_n)$.

În cel de-al patru-lea paragraf, valorile obținute pentru modulul de rezistență maxim sunt comparate cu valorile calculate pentru aceleași condiții, pe baza modelului empiric *Wu et.al. (1984)*, acest model fiind singurul din cele obținute din literatura de specialitate care în relațiile propuse ia în considerare și influența conținutului de apă.

Rezultatele obținute în urma testelor arată o influență importantă a conținutului de apă, respectiv a densității efective și a frecvenței de vibrație, în comportarea modului de rezistență maxim la tăiere al materialelor granulare fine. În același timp se poate afirma că valorile modului de rezistență obținute pe baza rezultatelor testelor sunt în general în bună corelare cu valorile calculate cu ajutorul relațiilor obținute prin studiul literaturii de specialitate.

Se menționează că toate testele prezentate în acest capitol, atât cele preliminare pentru stabilirea proprietăților materialului granular considerat, cât și cele propriuzise pentru studiul caracteristicilor dinamice, au fost efectuate de către autor în laboratoarele de geotehnică ale Companiei GeoDelft, din Delft, Olanda, în primăvara anului 2001.

4.1 Tipul materialului granular considerat în testele de laborator

Pentru determinarea caracteristicilor dinamice prin teste de laborator, dintre câteva tipuri de materiale granulate a fost considerat un nisip ce prezintă un procent relativ ridicat de material fin. În acest fel, se așteaptă ca în cazul materialului considerat, conținutul de apă să determine un efect important asupra comportării pe parcursul unei compactări dinamice.

Curba distribuției granulometrice a materialului este prezentată în figura 4.1, iar celelalte caracteristici esențiale ale acestuia sunt:

- densitatea specifică a părții solide $\rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$;
- densitatea minimă (starea cel mai relaxată) $\rho_{min} = 1.411 \text{ gr/cm}^3$;
- densitatea maximă (starea cea mai densă) $\rho_{max} = 1.829 \text{ gr/cm}^3$;
- porozitatea maximă (starea cel mai relaxată) $n_{max} = 46.36 \%$;
- porozitatea minimă (starea cea mai densă) $n_{min} = 32.04 \%$.

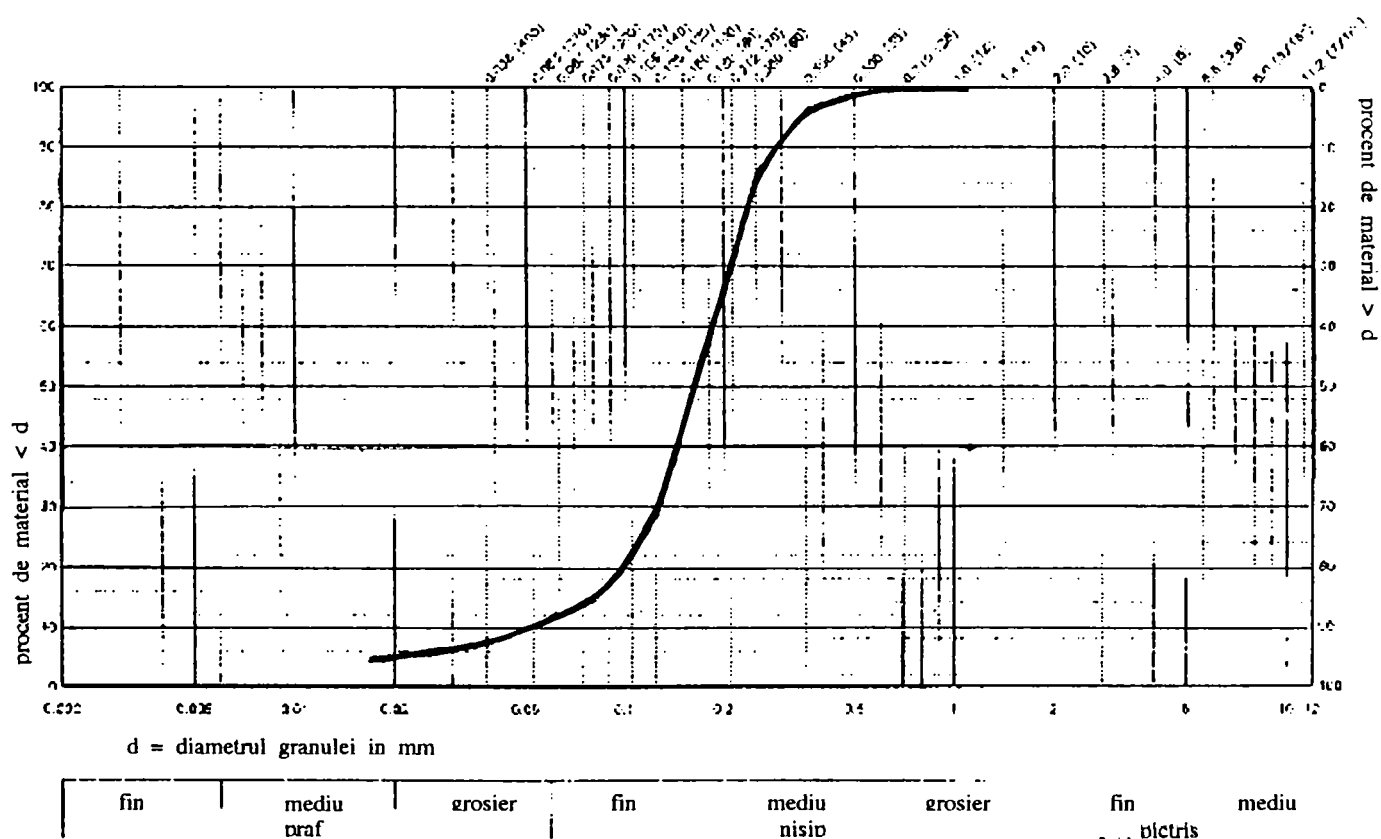


Figura 4.1 Curba granulometrică a nisipului considerat pentru testele de laborator

Din curba distribuției granulometrice se observă că:

- cca 66 % din granulele materialului au diametrul mai mic de 0.2 mm, cca 12 % au diametrul mai mic de 0.063 mm, și cca 5 % au diametrul mai mic de 0.02 mm;
- $\underline{D}_{10} = 0.053 \text{ mm}$, $\underline{D}_{60} = 0.185 \text{ mm}$ și $\underline{D}_{30} = 0.125 \text{ mm}$.

Astfel, coeficientul de uniformitate și coeficientul de curbură sunt:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.49 \quad \text{și} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} = 1.594$$

În concluzie se poate spune că materialul granular considerat pentru efectuarea testelor este un nisip prăfos, uniform (slab) gradat.

Relația de legătură densitate efectivă maximă - conținut de apă caracteristică nisipului considerat pentru testare a fost obținută prin intermediul unei serii de teste Proctor standard. Schema dispozitivului cu ajutorul căruia au fost efectuate aceste teste este prezentată în figura 4.2.

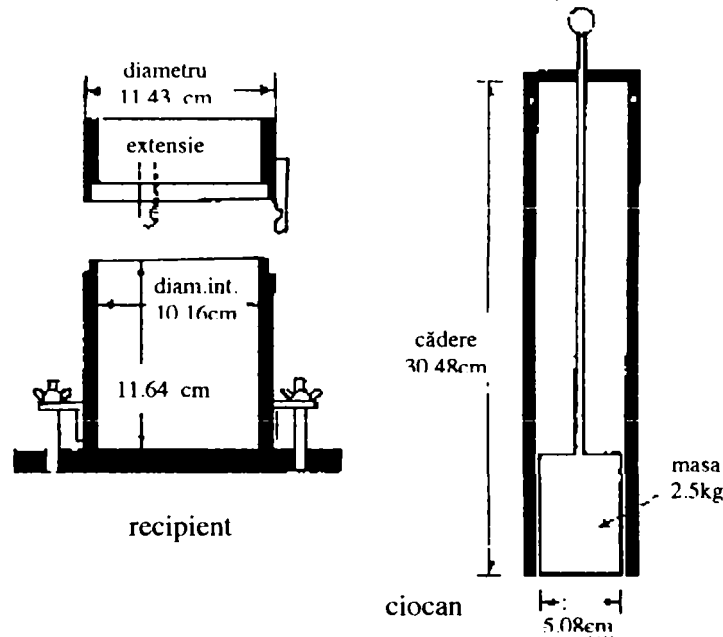


Figura 4.2 Dispozitivul testului Proctor standard

Ciocanul cu o masă de 2.5 kg a fost lăsat să cadă vertical liber de-a lungul unei curse de 304.8 mm. Nisipul a fost plasat și compactat în recipient în trei straturi succesive, numărul loviturilor per strat fiind 27. Testele au fost efectuate pentru 8 niveluri ale conținutului de apă, între 0 (starea complet uscată a materialului) și cca 14 %.

După fiecare test s-a determinat densitatea ρ și procentul conținutului de apă w , iar apoi, densitatea efectivă (în stare uscată), gradul de compactare, indicele porilor, porozitatea și, respectiv, densitatea relativă au fost calculate cu următoarele relații (vezi anexa A):

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}, \quad D_c = \frac{\rho_{dry}}{\rho_{max}} \times 100, \quad e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1, \quad n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad D_r = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} \times 100$$

(4.1 ÷ 4.5)

Rezultatele testelor sunt prezentate în tabelul 4.1, iar curba ce reprezintă relația densitate efectivă maximă - conținut de apă este prezentată în figura 4.3.

Se observă că densitatea efectivă maximă prezintă două vârfuri de valoare aproximativ egală, 1.682 gr/cm³, care corespund unui conținut de apă de 0 % (starea uscată), respectiv de cca 12 % (care astfel reprezintă procentul optim al conținutului de apă pentru materialul considerat). Corespunzător, gradul de compactare maxim, calculat ca procent al densității determinate față de densitatea maximă ρ_{max} , este de cca 92 %. Nivelul cel mai ridicat al densității relative s-a obținut de cca 69 %, pentru porozitatea de 36.5 %, corespunzător situațiilor complet uscată și cea a conținutului de apă optim.

Tabelul 4.1 Rezultatele testelor Proctor standard

m (gr)	m _d (gr)	m _{apă} (gr)	w (%)	ρ (gr/cm ³)	ρ_d (gr/cm ³)	D _c (%)	e (%)	n (%)	D _r (%)
1588.6	1588.6	0	0.0	1.684	1.684	92.1	57.3	36.4	69.3
1596.4	1539	57.4	3.7	1.693	1.632	89.2	62.4	38.4	55.4
1637	1547.1	89.9	5.8	1.736	1.640	89.7	61.6	38.1	57.7
1681.4	1560.8	120.6	7.7	1.783	1.655	90.5	60.1	37.6	61.5
1728.3	1574.5	153.8	9.8	1.832	1.669	91.3	58.7	37.0	65.3
1772.1	1586.4	185.7	11.7	1.879	1.682	92.0	57.6	36.5	68.6
1771.4	1567.1	204.3	13.0	1.878	1.661	90.8	59.5	37.3	63.2
1724.6	1507.1	217.5	14.4	1.828	1.598	87.4	65.8	39.7	46.5

Liniile de saturare, ce reprezintă variația densității efective cu conținutul de apă pentru un anumit procent al conținutului de aer n_a , au fost stabilite pe baza expresiei următoare:

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_s w + \rho_w} (1 - n_a) \quad (4.6)$$

în care densitatea apei a fost considerată $\rho_w = 1 \text{ gr/cm}^3$.

Având în vedere conținutul de apă optim la compactare de 11.7 % și vârful densității efective maxime de 1.682 gr/cm³, conținutul de aer corespunzător celui mai ridicat nivel obținut al densității se calculează:

$$n_a = (1 - w_{opt} \rho_d - \frac{\rho_d}{\rho_s}) \times 100 = 16.8 \% \quad (4.7)$$

ceea ce determină linia de saturare $1 - n_a = 83.2 \%$.

Linia de 100 % saturare corespunde conținutului de aer $n_a = 0$.

Variațiile gradului de compactare D_c și a densității relative D_r cu conținutul de apă, variații care urmează relația de legătură $\rho_d - w$, sunt prezentate în figura 4.4.

Se observă că cel mai puternic efect al forțelor de capilaritate asupra rezultatului compactării are loc pentru procent al conținutului de apă de cca 3.7 %, valoarea densității efective maxime obținută pentru acest nivel fiind numai de 1.632 gr/cm³.

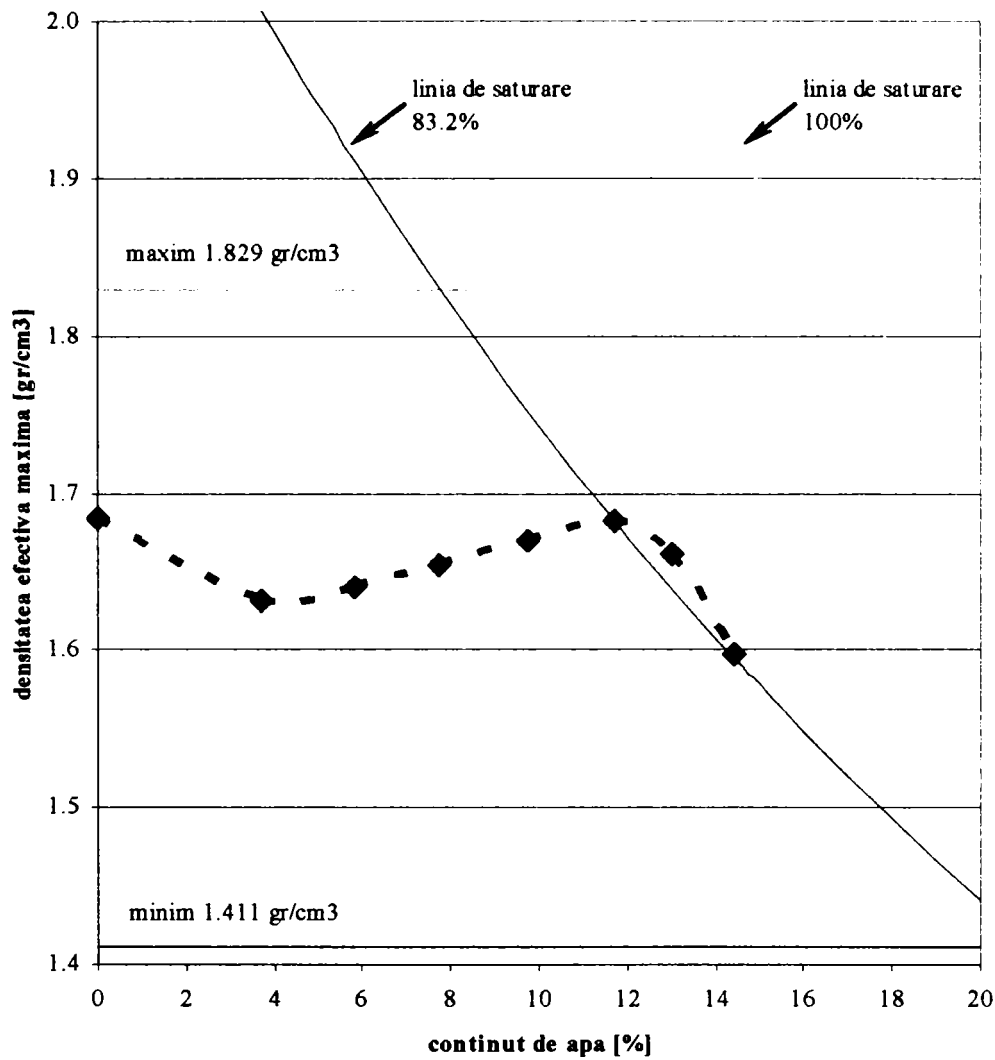


Figura 4.3 Curba $\rho_d - w$ obținută prin testele Proctor standard

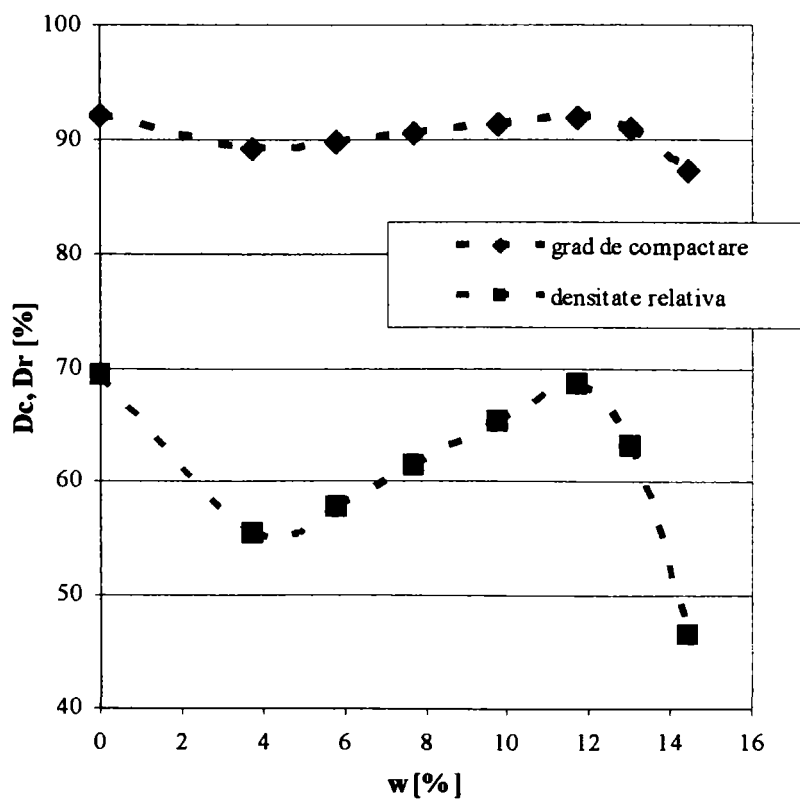


Figura 4.4 Relațiile $D_c - w$ și $D_r - w$ determinate de rezultatele testelor

4.2 Prezentarea testelor de Vibrare prin Torsiune Liberă

4.2.1 Pregătirea epruvetelor

Pentru a studia relația dintre rezultatele obținute în urma testelor de Vibrare prin Torsiune Liberă (VTL) și conținutul de apă al nisipului, corespunzător diverselor condiții de densitate efectivă, a fost stabilit ca testele să fie efectuate pentru două valori ale gradului de compactare D_c . Astfel, primul grup de epruvete a fost realizat în așa fel încât acestea să fie caracterizate de un grad de compactare ridicat, cca 90 %, iar cel de al doi-lea grup să prezinte un grad de compactare redus, de cca 84 %. În alți termeni, aceasta înseamnă că epruvetele cu compactare ridicată trebuie să prezinte o densitate efectivă ρ_d de cca 1.65 gr/cm³, o porozitate n de cca 37.7 % și o densitate relativă D_r de cca 57.4 %, iar epruvetele compactate mai slab să prezinte aceste caracteristici la valoarea de 1.54 gr/cm³, 41.9 % și, respectiv, 30.8 %.

S-au considerat cinci niveluri pentru valoarea conținutului de apă al epruvetelor, 0, 4, 6, 8 și, respectiv, 12 %. Pentru a obține epruvete de nisip omogene, acestea au fost construite prin dispunerea materialului în câteva straturi, fiecare strat fiind compactat cu un număr corespunzător de lovituri cu ciocanul. Gradul de compactare dorit pentru fiecare epruvetă a fost atins prin varierea numărului de straturi dispuse, respectiv prin varierea numărului de lovituri cu ciocanul de compactat per strat. Pentru a asigura o continuitate corespunzătoare a materialului pe înălțimea epruvetelor, contactul dintre straturile dispuse într-o epruvetă a fost îmbunătățit prin zgârierea ușoară suprafeței stratului compactat. Contactul dintre epruveta de nisip și piesele metalice de la partea superioară și, respectiv, inferioară, prin intermediul cărora se impune torsiunea, a fost asigurat de suprafața rugoasă (abrazivă) a acestor piese.

Segvențele de pregătire a epruvetelor din nisip este prezentată în mod succesiv prin intermediul figurilor 4.5 ÷ 4.8. În figura 4.5 este prezentat vasul în care nisipul este pregătit la umiditatea dorită, precum și jumătățile carcasi metalice în care se prepară epruveta și piesele ce vor fixa părțile superioară și inferioară a epruvetei. Figura 4.6 prezintă modul de umplere cu nisip a carcasi metalice asamblate, iar în figura 4.7 se prezintă modul de compactare al unui strat de nisip depus în carcasă. Se observă că epruveta este construită într-un manșon de cauciuc prevăzut în partea interioară a carcasi metalice. După umplerea completă a carcasi metalice, la partea superioară se fixează piesa prin intermediul căreia se va induce torsiunea dorită în epruvetă. În această situație, prin intermediul unor orificii practicate în talpa inferioară, în interiorul epruvetei se poate aplica sucțiunea ce va produce presiunea efectivă la care trebuie conduse testele. Întrucât sucțiunea aplicată asigură stabilitatea epruvetei în interiorul

manșonului de cauciuc, cele două jumătăți ale carcasi metalice pot fi acum îndepărtate (fig.4.8) pentru a nu stânjeni răsucirea liberă a epruvetei.



Figura 4.5 Elementele componente la pregătirea epruvetei



Figura 4.6 Umplerea carcasi pentru construirea epruvetei de nisip

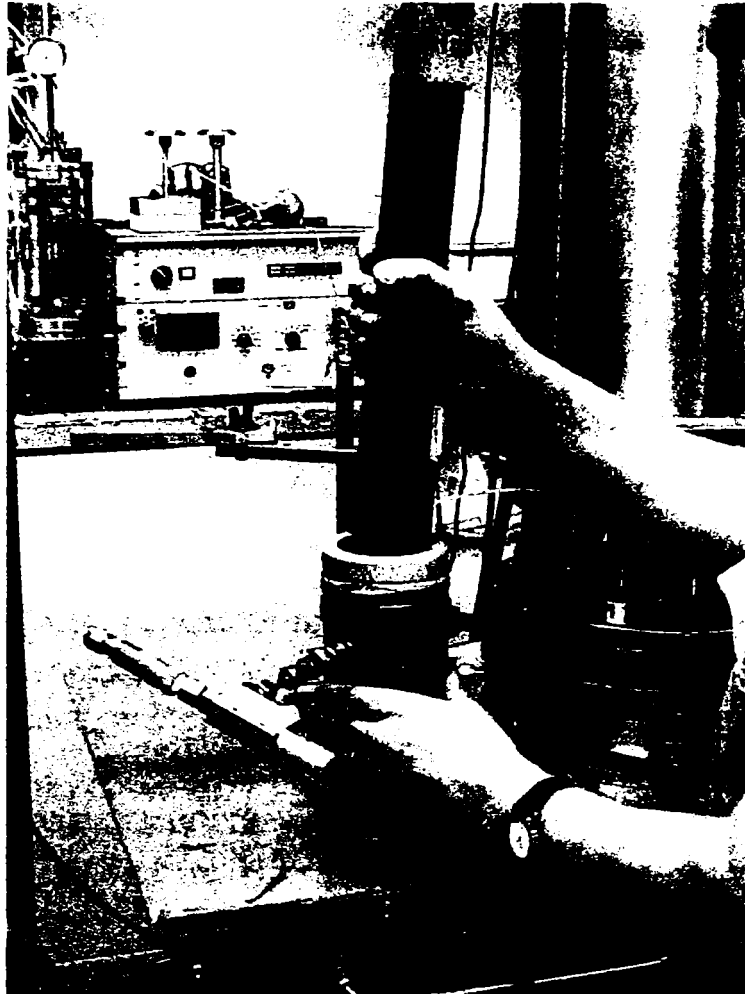


Figura 4.7 Compactarea nisipului din epruvetă

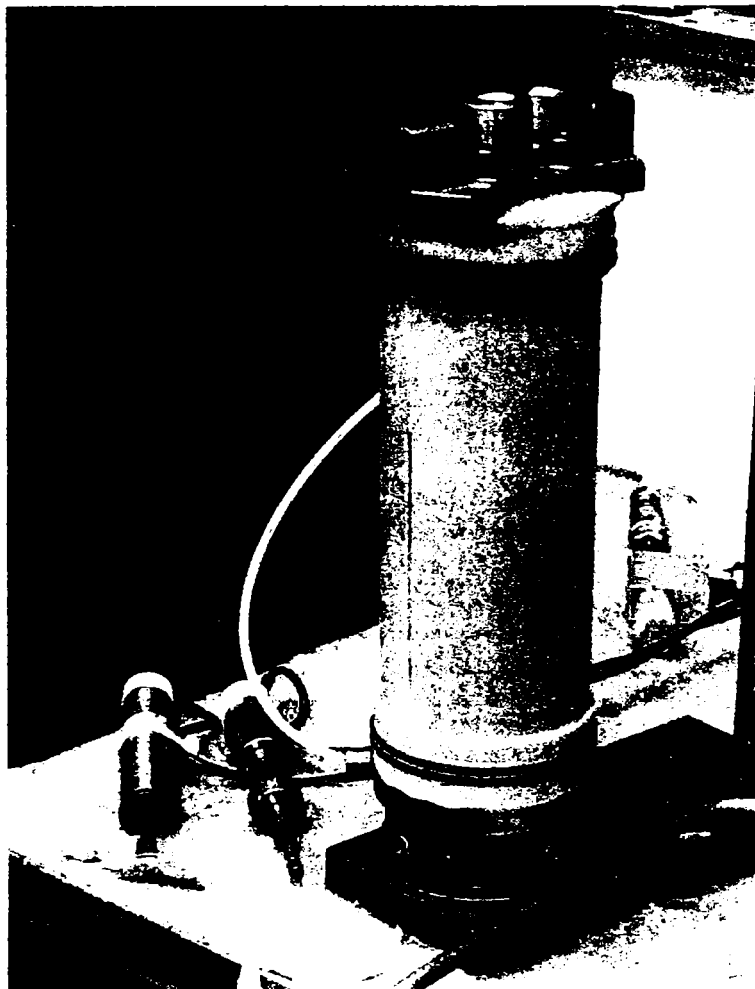


Figura 4.8 Epruvetă pregătită pentru efectuarea testului VTL

Înălțimea epruvetelor, fiind dată de înălțimea carcabei în care acestea au fost construite, a fost considerată întotdeauna aceeași, de 14.5 cm, în timp ce diametrul epruvetelor a fost măsurat de fiecare dată.

Valoarea presiunii efective asupra epruvetelor, obținută prin sucțiune, a fost considerată la un nivel ce corespunde presiunii exercitate pe teren de greutatea statică a unui rol vibrator de dimensiuni medii. Astfel, această valoare a fost dispusă la 46 kPa.

După efectuarea fiecărui test VTL, conținutul de apă al epruvetei a fost determinat în mod riguros.

Caracteristicile obținute pentru epruvetele din nisip pregătite pentru testare prin VTL sunt prezentate în tabelul 4.2. Chiar dacă nu au fost atinse la toate epruvetele exact aceleași valori dorite pentru parametrii considerați (masa efectivă m_d , densitatea efectivă ρ_d , gradul de compactare D_c , porozitatea n , densitatea relativă D_r), se poate observa că abaterea față de valoarea medie este în fiecare caz sub 1 % (vezi deasemenea anexa B).

Tabelul 4.2 Caracteristicile epruvetelor de nisip pregătite pentru testele VTL

densitate ridicată

test no.	codul testului	diam. (cm)	m (gr)	m_d (gr)	w (%)	ρ_d (gr/cm ³)	D_c (%)	n (%)	D_r (%)
1	D90w0	6.62	818	818	0.0	1.639	89.6	38.2	57.3
2	D90w4	6.67	871	839	3.8	1.656	90.5	37.5	61.8
3	D90w6	6.71	890	840	6.0	1.638	89.6	38.2	57.1
4	D90w8	6.65	897	832	7.8	1.652	90.3	37.7	60.8
5	D90w12	6.68	930	831.8	11.8	1.637	89.5	38.2	56.8
val. medie:				832.2		1.644	89.9	37.9	58.8

densitate redusă

test no.	codul testului	diam. (cm)	m (gr)	m dry (gr)	w (%)	ρ_d (gr/cm ³)	D_c (%)	n (%)	D_r (%)
1	D84w0	6.6	754	754	0.0	1.520	83.1	42.6	26.0
2	D84w4	6.66	803	774.3	3.7	1.533	83.8	42.2	29.4
3	D84w6	6.65	818	772	6.0	1.533	83.8	42.2	29.4
4	D84w8	6.63	819	760	7.8	1.518	83.0	42.7	25.5
5	D84w12	6.62	846	757	11.8	1.517	82.9	42.8	25.1
val. medie:				763.5		1.524	83.3	42.5	27.1

4.2.2 Desfășurarea testelor VTL

Dispozitivul de vibrație prin torsiune liberă a fost conceput pentru a evalua comportarea dinamică a diverselor materiale, dar în special pe cea a solurilor. Pe baza rezultatelor testelor VTL, desfășurate pentru diverse valori ale deformațiilor specifice la tăiere (de la 10^{-3} % până la 1 %), se pot stabili în mod direct modulul de rezistență la tăiere G și raportul de vâscozitate D .

Dispozitivul, prezentat schematic în figura 4.9, constă dintr-un aparat de compresiune triaxială modificat, în care pot fi testate epruvete cu diametrul cuprins între 50 și 66 mm. În figura 4.10 este prezentată o epruvetă de nisip fixată în aparatul VTL pregătit pentru desfășurarea testului. Spre deosebire de prezentarea schematică, în figura 4.10 carcasa incintei aparatului nu este fixată la partea inferioară pentru că presiunea considerată în teste a fost relativ mică (46 kPa) și deci a fost dezvoltată prin sucțiune.

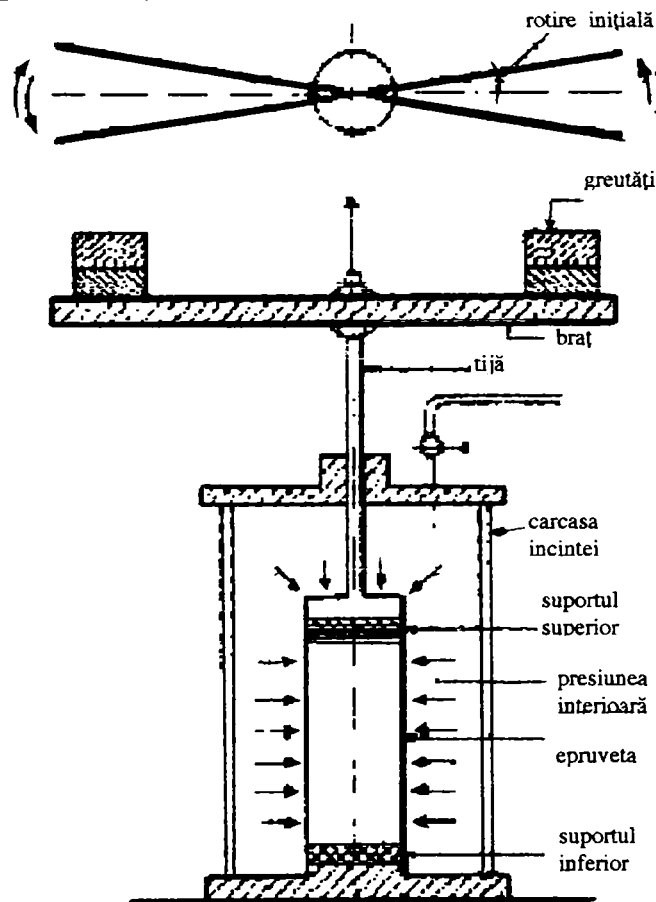


Figura 4.9 Prezentarea schematică a dispozitivului VTL

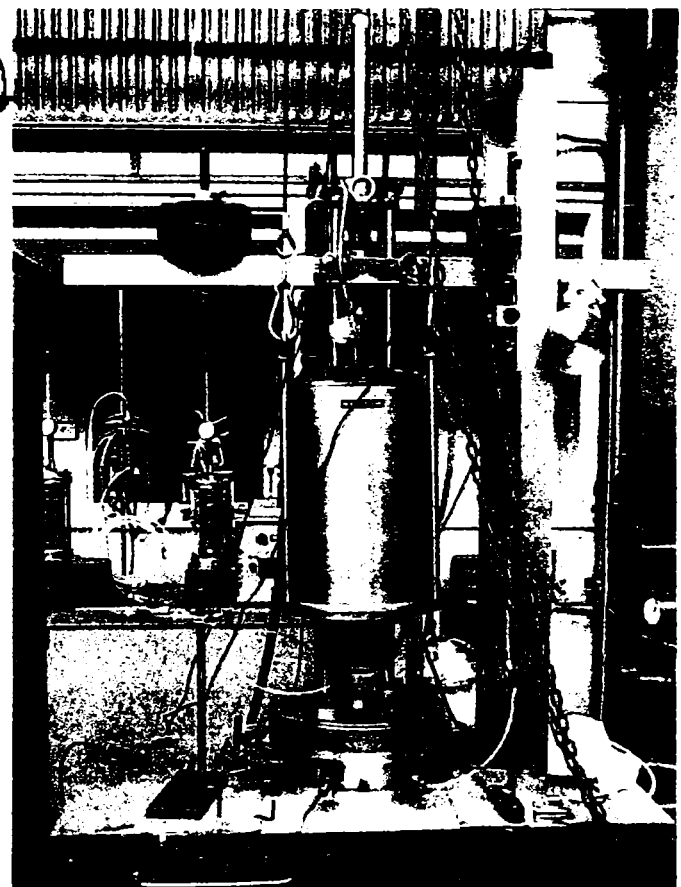


Figura 4.10 Dispozitivul VTL pregătit pentru desfășurarea testului

Prin intermediul plăcii superioare și a tijei, partea superioară a epruvetei este conectată la brațul de acțiune ce are o lungime $l_{braț} = 95 \text{ cm}$. Se menționează că tija verticală trece printr-un lagăr fără frecare în care presiunea poate fi echilibrată hidraulic cu presiunea dezvoltată în incinta aparatului. Suportul inferior al epruvetei de nisip este fixat de placa de

bază, iar suportul de la partea superioară a epruvetei este conectat liber (fig.4.11) la tija verticală prin intermediul căreia se transmite torsiunea.

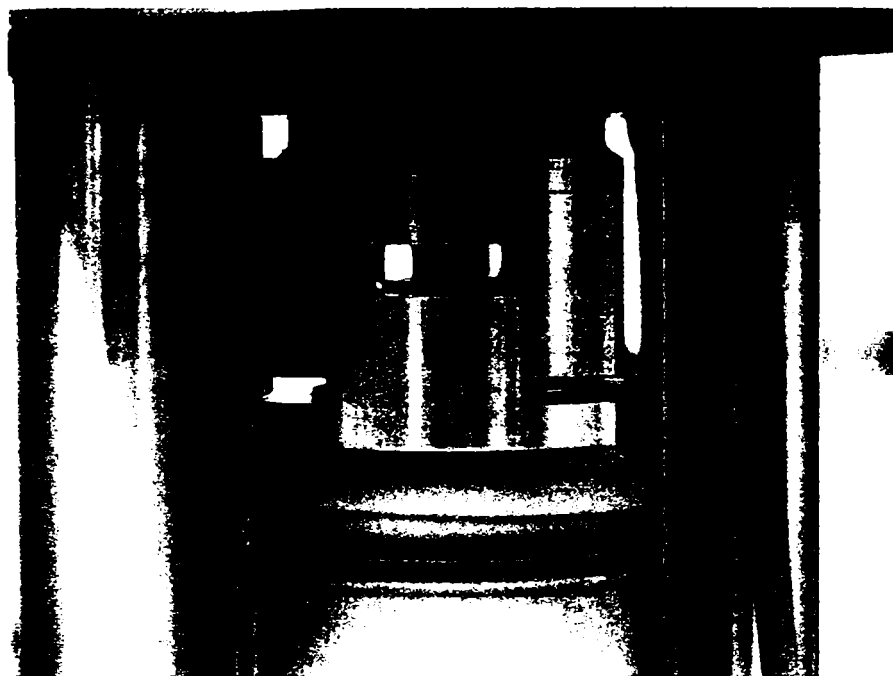


Figura 4.11 Detaliu de cuplare a epruvetei la partea superioară

Prin intermediul unui ac împingător (fig.4.12) se impune brațului de acționare o mică rotire inițială, în acest fel încărcându-se epruveta cu o tăiere prin torsiune statică.



Figura 4.12 Detaliu al acului împingător

Prin eliberarea bruscă a brațului din împingerea impusă, acesta va oscila liber în jurul poziției de repaus, iar epruveta se va comporta ca într-un mod de vibrație cu vâscozitate. Deplasarea brațului pe parcursul mișcării oscilatorii de torsiune este măsurată prin intermediul a doi senzori, unul pentru obținerea unei valori absolute, iar celălalt pentru obținerea unei valori relative. Cei doi senzori sunt plasați în dreptul brațului de

acționare, simetric în raport cu axul epruvetei, la o distanță de 60 mm față de acesta. Pentru toate testele efectuate, deplasarea inițială (indicată de senzori) a fost dispusă la cca 0.08 mm . A fost dispus ca deplasarea brațului să fie măsurată și înregistrată la fiecare 0.002 secunde , pentru o durată totală a mișcării de 15 secunde . Relația sinusoidală a deplasării de torsiune în timp este înmagazinată printr-un dispozitiv de înregistrare rapid, și este analizată într-un computer integrat în ansamblul VTL (fig.4.13).

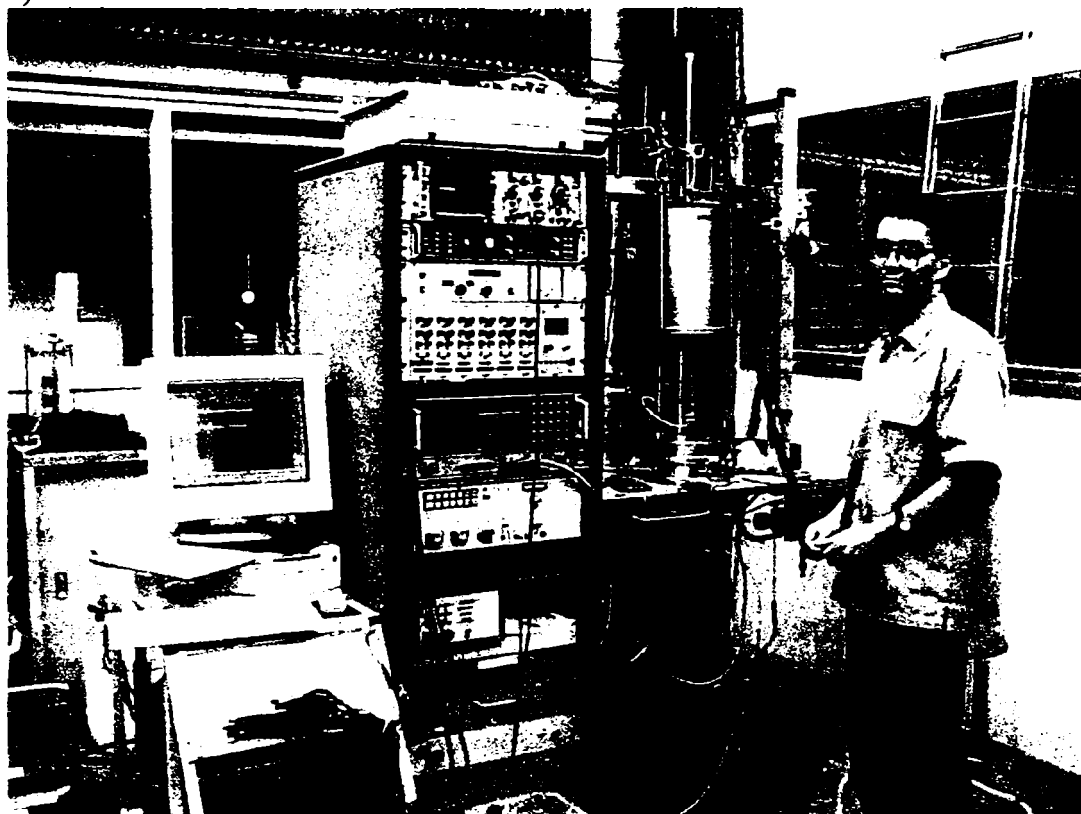


Figura 4.13 Vedere generală a dispozitivului integrat VTL

Deplasarea verticală a brațului de acționare orizontal a fost monitorizată în permanență prin intermediul unui senzor plasat la capătul superior al tijeii, această deplasare trebuind să rămână zero pe parcursul desfășurării testului. Se menționează faptul că greutatea totală a brațului de acționare este echilibrată hidraulic, astfel încât mecanismul de încărcare să nu determine în epruvetă un alt tip de solicitare în afara torsiunii.

Modulul de rezistență la tăiere dinamică este determinat din relația de legătură frecvență - unghi de rotire, iar raportul de vâscozitate este indicat de către descreșterea amplitudinii de vibrație. Frecvența de rotire a unei epruvete date este modificată prin schimbarea masei greutăților plasate pe brațul de acționare. Pentru testele efectuate au fost considerate trei niveluri ale frecvenței de oscilație, fiecare epruvetă fiind testată în trei trepte: fără greutăți adiționale pe brațul de acționare, cu două greutăți simetrice a câte 5 kg , respectiv cu două greutăți simetrice a câte 10 kg plasate pe brațul de acționare. În afară de masa greutăților adiționale, trebuie luate în considerare masa brațului $m_{\text{braț}} = 4.733\text{ kg}$ și masa suporturilor greutăților adiționale $m_{\text{sup}} = 2 \times 481.7\text{ gr}$ (acestea acționând în

permanență), respectiv masa piulițelor de siguranță a greutateilor adiționale $m_p = 2 \times 82.6 \text{ gr}$ (care acționează împreună cu greutateile adiționale). Greutățile adiționale au fost plasate la o distanță $l_{ad} = 25 \text{ cm}$ față de axul epruvetei, pentru toate testele.

Având în vedere că a fost dispusă următoarea variație a parametrilor considerați:

- două niveluri pentru densitatea efectivă a epruvetelor de nisip, cca 1.65 și, respectiv, 1.54 gr/cm^3 ,
- cinci niveluri pentru procentul conținutului de apă, pentru fiecare valoare a densității efective, $0, 4, 6, 8$, și, respectiv, 12% ,
- trei niveluri pentru frecvența de oscilație pentru fiecare epruvetă, determinate de $m_{ad} = 0, 2 \times 5$ și, respectiv, $2 \times 10 \text{ kg}$,

înseamnă că au fost efectuate un număr de 30 de teste de vibrație prin torsiune liberă.

Testele a căror parametrii considerați nu au prezentat valorile corespunzătoare (dorite) au fost refăcute în condițiile necesare. Deși în studiul de față au fost eliminate, rezultatele acestor teste neîncadrate pot fi totuși utilizate pentru diverse alte investigații.

Un rezultat tipic al testelor VTL, reprezentând deplasările absolută și relativă măsurate în timp, este dat în figura 4.14 după ce a fost corectat relativ la poziția de referință medie a brațului de acționare.

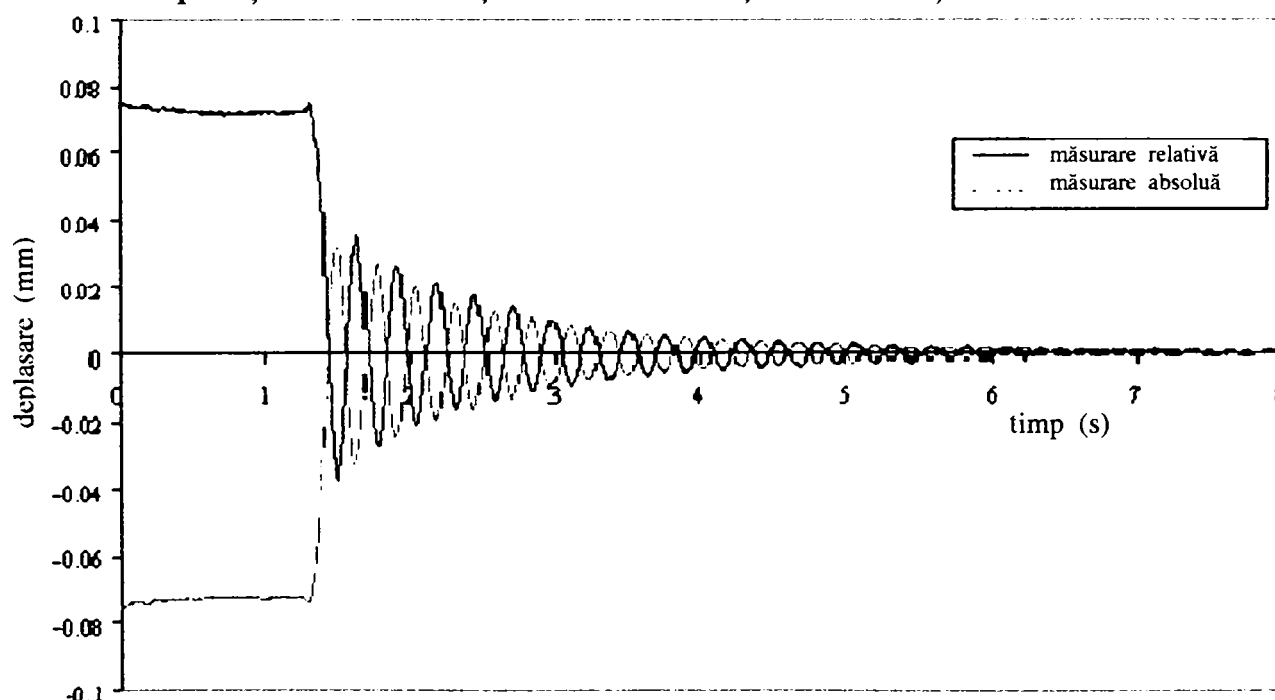


Figura 4.14 Tipul rezultatului măsurat al testelor VTL (test D84w8m5)

Pentru a organiza atât desfășurarea testelor cât și procesul de interpretare a rezultatelor, testele au fost clasificate prin codificarea denumirii lor în funcție de valorile dispuse pentru parametrii epruvetelor. Astfel testele sunt indicate în modul următor: **D**(valoarea gradului de compactare al epruvetei)**w**(procentul conținutului de apă al materialului)**m**(masa greutății dispusă pe brațul de acționare).

4.3 Interpretarea rezultatelor testelor VTL

Prin eliminarea primei părți a ciclogramei măsurate (înregistrate) deplasare – timp (fig.4.14), începutul mișcării oscilatorii este stabilită relativ la un moment de start (timp zero) al deplasării relative așa cum se prezintă în figura 4.15.

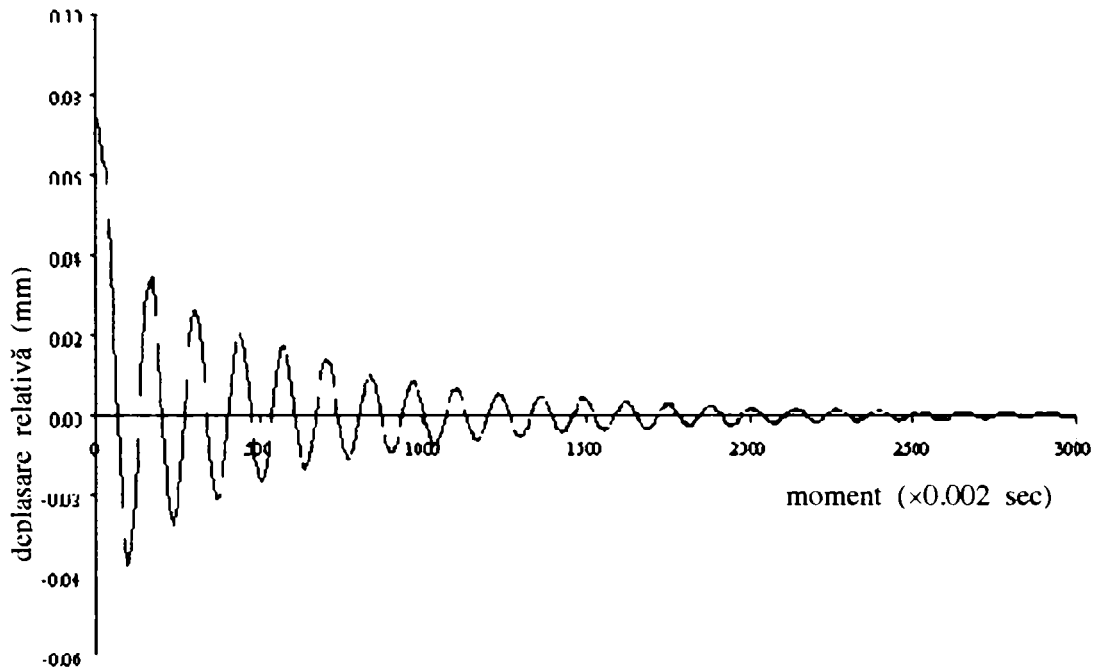


Figura 4.15 Rezultatul tipic modificat al testelor VTL (test D84w8m5)

Pentru fiecare ciclu de oscilare au fost selectate deplasările pozitivă și negativă maxime, iar perioada de oscilație T a fost determinată prin medierea perioadelor corespunzătoare primelor 15 cicluri distincte. Deformația specifică unghiulară maximă a epruvetei de nisip a fost calculată la fiecare ciclu de oscilare (în fig.4.16 este prezentată pentru cazul testului D84w8m5) cu relația următoare:

$$\gamma_{\max} = \frac{(diam) \times (depl)}{2h \times (pos)} \quad (\text{rad}) \quad (4.8)$$

în care:

$(diam)$ este diametrul epruvetei, $(depl)$ este deplasarea relativă modificată (fig.4.15), (pos) este poziția senzorului deplasării relative în raport cu axa epruvetei (60 mm), iar h este înălțimea epruvetei (145 mm).

Corespunzător unui sistem cu un grad de libertate cinematică, liber și cu vâscozitate, decrementul logaritmic, raportul de vâscozitate și frecvența naturală de vibrație au fost calculate cu ajutorul următoarelor formule (Das, 1983):

$$\delta = \ln \frac{\gamma_i}{\gamma_{i+1}}, \quad D = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad \text{și} \quad f_n = \frac{1}{T\sqrt{1-D^2}} \quad (1/s) \quad (4.9) \quad (4.10) \quad (4.11)$$

în care γ_i și γ_{i+1} sunt deformații unghiulare specifice extreme medii pentru ciclurile consecutive i și $i+1$, iar D este determinat pentru o valoare δ medie pe primele cicluri considerate.

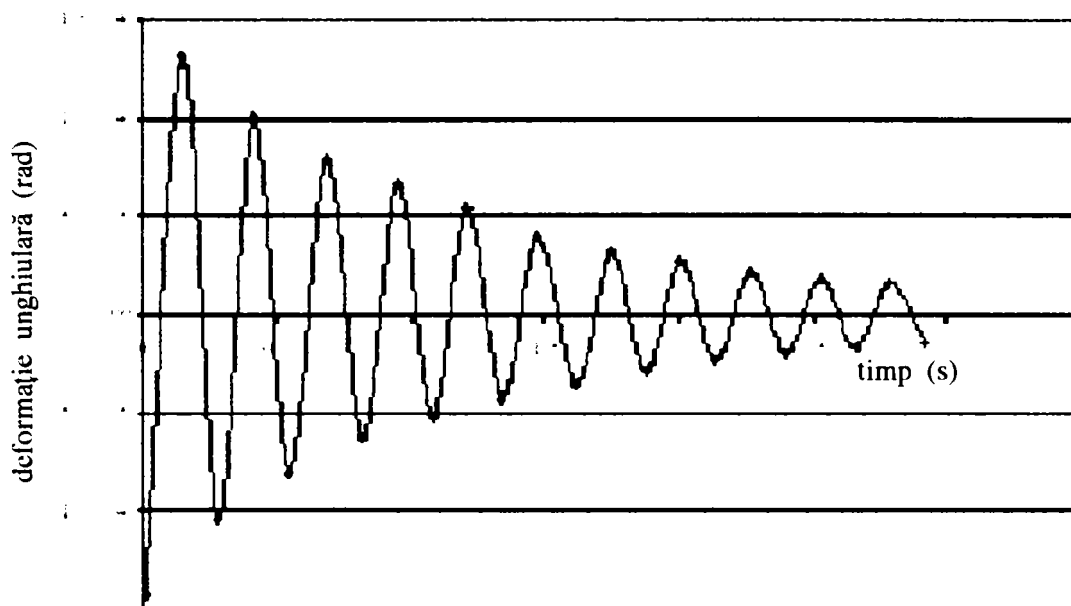


Figura 4.16 Deformația specifică unghiulară tipică a epruvetei

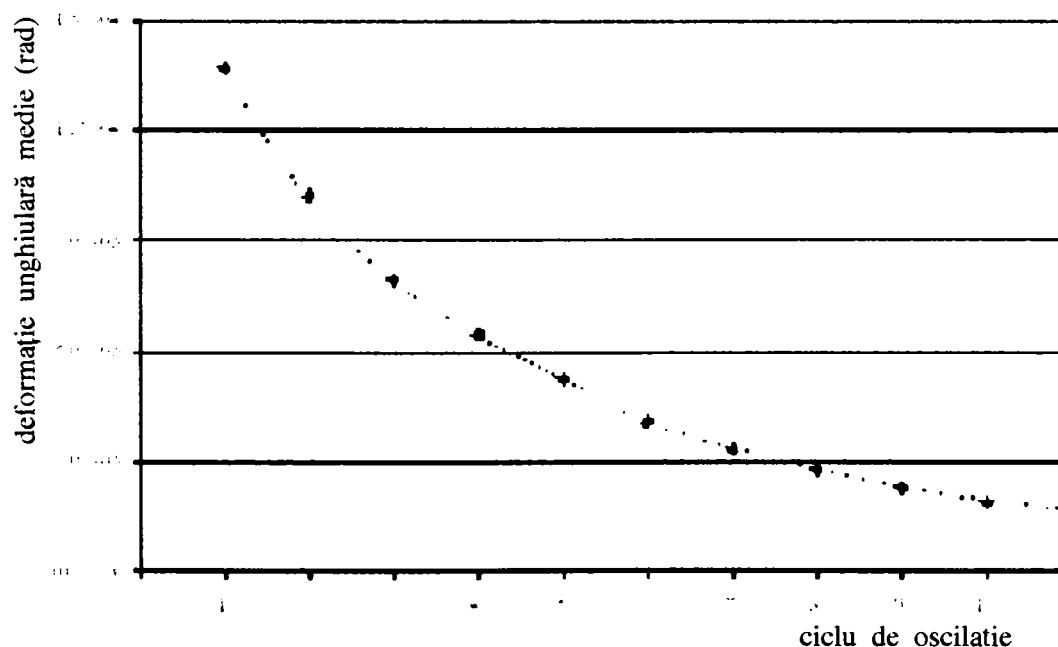


Figura 4.17 Deformația specifică extremă medie / ciclu

Modulul de rezistență la tăiere maxim a fost calculat (cu relația 3.28) pentru fiecare rezultat al testelor în funcție de densitatea epruvetei respective și de viteza undelor tăietoare: $G_o = \rho v_s^2$.

Întrucât atât densitatea ρ a epruvetei cât și viteza v_s a undelor tăietoare sunt determinate pe baza parametrilor considerați pentru testele VTL (i.e. conținut de apă w , densitate efectivă ρ_d și frecvență naturală de vibrație f_n), modulul rezistenței la tăiere maxim este dat de următoarea funcție (Das, 1983):

$$G_o = (1 + w)\rho_d \frac{4\pi^2 f_n^2 h^2}{\alpha^2} \quad (4.12)$$

în care h este înălțimea epruvetei, iar α este un parametru dat de raportul dintre momentul de inerție polar al epruvetei J_s și momentul de inerție polar al masei greutăților adiționale J_m :

$$\alpha \operatorname{tg} \alpha = \frac{J_s}{J_m} \quad (4.13)$$

cu $J_s = (1 + w)\rho_d h \frac{\pi r^4}{2}$ (4.14)

și $J_m = J_{arm} + J_{sup} + J_{att} = \frac{m_{arm} l_{arm}^2}{12} + m_{sup} l_{att}^2 + (m_{att} + m_{mul}) l_{att}^2$ (4.15)

Se observă că parametrul α deasemenea depinde atât de caracteristicile epruvetei cât și de cele ale sistemului de acționare. Raza epruvetei cilindrice s-a notat cu r .

În tabelul 4.3 este prezentat un calcul curent al deformației specifice la tăiere, al perioadei de oscilație și al decrementului logaritmic.

Pentru exemplul considerat aici (D84w8m5), parametrii caracteristici testului sunt:

diametrul epruvetei = **6.63** cm, înălțimea epruvetei = **14.5** cm, densitatea efectivă (în stare uscată) = **1.518** gr/cm³, conținutul de apă = **7.8** %, masa greutăților adiționale pe brațul de acționare (inclusiv piulițele de siguranță) = **5.0826** kg, brațul greutăților adiționale = **25** cm, lungimea brațului de acționare = **95** cm, masa brațului de acționare = **4.733** kg, masa suporturilor pentru greutățile adiționale = **0.4817** kg, poziția senzorului = **6** cm, presiunea efectivă = **46** kN/m²;

iar mărimile calculate sunt:

momentul de inerție polar al epruvetei = **4.50e-04** kg.m², momentul de inerție polar al greutăților adiționale = **6.35e-01** kg.m², momentul de inerție polar al brațului de acționare (inclusiv suporturile pentru greutăți) = **4.16e-01** kg.m², parametrul α = **2.07e-02**, perioada de oscilație = **0.265** s, decrementul logaritmic/11 cicluri = **2.11e-01**, raportul de vâscozitate = **3.35e-02**, frecvența naturală de oscilație = **3.772** 1/s = **23.70** rad/s, viteza undelor tăietoare = **1.66e+02** m/s, modulul de rezistență la tăiere maxim = **4.52e+04** kN/m².

Valorile modulului de rezistență maxim la tăiere, obținute pe baza rezultatelor tuturor testelor efectuate, sunt prezentate în tabelele 4.4 până

la 4.9. Prezentarea mărimilor calculate este organizată în funcție de masa greutăților adiționale, nivelul densității efective și conținutul de apă.

Din nefericire, datorită unor probleme tehnice de funcționare a dispozitivului VTL, testele corespunzătoare unui procent al conținutului de apă de 6 % la nivelul scăzut al densității efective (1.524 gr/cm^3) nu au furnizat rezultate utile studiului.

Variația frecvenței naturale de oscilație cu conținutul de apă, ținând cont de nivelul valorii densității efective, este prezentată în figura 4.18.

Tabelul 4.3 Calculul deformației specifice unghiulare, a perioadei de vibrație și a decrementului logaritm (testul D84w8m5)

ciclul no.	timp (s)	depl (mm)	def.spec. (-)	γ /ciclu (-)	T (s)	δ /ciclu (-)
0	0.002	-3.74E-02	-1.43E-04			
	0.146	3.45E-02	1.31E-04	1.37E-04	0.276	
1	0.278	-2.73E-02	-1.04E-04			
	0.41	2.62E-02	1.00E-04	1.02E-04	0.264	0.295
2	0.542	-2.11E-02	-8.03E-05			
	0.684	2.08E-02	7.91E-05	7.97E-05	0.276	0.247
3	0.818	-1.64E-02	-6.26E-05			
	0.95	1.75E-02	6.65E-05	6.46E-05	0.262	0.210
4	1.08	-1.35E-02	-5.15E-05			
	1.21	1.42E-02	5.41E-05	5.28E-05	0.262	0.202
5	1.342	-1.11E-02	-4.24E-05			
	1.472	1.03E-02	3.91E-05	4.08E-05	0.276	0.259
6	1.618	-9.32E-03	-3.55E-05			
	1.748	8.34E-03	3.18E-05	3.37E-05	0.26	0.191
7	1.878	-7.62E-03	-2.90E-05			
	2.008	6.97E-03	2.66E-05	2.78E-05	0.26	0.191
8	2.138	-6.27E-03	-2.39E-05			
	2.27	5.81E-03	2.22E-05	2.30E-05	0.262	0.189
9	2.4	-5.27E-03	-2.01E-05			
	2.53	4.89E-03	1.86E-05	1.94E-05	0.26	0.173
10	2.66	-4.49E-03	-1.71E-05			
	2.79	4.25E-03	1.62E-05	1.66E-05	0.26	0.152
11	2.92	-3.77E-03	-1.44E-05			

Tabelul 4.4 Rezultatele calculate ale testelor
D84w0m0 până la D84w12m0

masa greutății adiționale = 0 kg

densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1520	1.51E-01	5.06E-02	6.64	1.92E+02	5.62E+04
3.7	1533	1.29E-01	3.69E-02	7.76	2.16E+02	7.42E+04
6	1533	1.28E-01	3.21E-02	7.79	2.15E+02	7.54E+04
7.8	1518	1.38E-01	3.03E-02	7.27	2.01E+02	6.63E+04
11.8	1517	1.52E-01	3.22E-02	6.57	1.79E+02	5.46E+04

Tabelul 4.5 Rezultatele calculate ale testelor
D90w0m0 până la D90w12m0

densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1639	1.35E-01	3.39E-02	7.39	2.05E+02	6.88E+04
3.8	1656	1.26E-01	3.00E-02	7.96	2.13E+02	7.77E+04
6	1638	1.19E-01	4.53E-02	8.43	2.21E+02	8.51E+04
7.8	1652	1.20E-01	3.07E-02	8.36	2.21E+02	8.66E+04
11.8	1637	1.34E-01	3.58E-02	7.47	1.93E+02	6.78E+04

Tabelul 4.6 Rezultatele calculate ale testelor
D84w0m5 până la D84w12m5

masa greutății adiționale = 2×5 kg

densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1520	2.90E-01	4.39E-02	3.45	1.59E+02	3.84E+04
3.7	1533	2.55E-01	4.88E-02	3.93	1.74E+02	4.81E+04
7.8	1518	2.65E-01	3.35E-02	3.77	1.66E+02	4.52E+04
11.8	1517	2.86E-01	3.13E-02	3.50	1.52E+02	3.91E+04

Tabelul 4.7 Rezultatele calculate ale testelor
D90w0m5 până la D90w12m5

densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1639	2.41E-01	3.76E-02	4.15	1.83E+02	5.51E+04
3.8	1626	2.07E-01	2.89E-02	4.83	2.09E+02	7.41E+04
6	1638	2.08E-01	4.57E-02	4.80	2.00E+02	6.98E+04
7.8	1652	2.19E-01	3.22E-02	4.56	1.91E+02	6.52E+04
11.8	1637	2.44E-01	3.28E-02	4.10	1.68E+02	5.18E+04

Tabelul 4.8 Rezultatele calculate ale testelor
D84w0m10 până la D84w12m10

masa greutății adiționale = 2×10 kg

densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524$ kg/m³

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1520	3.86E-01	4.79E-02	2.59	1.51E+02	3.47E+04
3.7	1533	3.33E-01	4.38E-02	3.01	1.68E+02	4.50E+04
7.8	1518	3.49E-01	3.03E-02	2.87	1.59E+02	4.16E+04
11.8	1517	3.81E-01	3.25E-02	2.63	1.44E+02	3.51E+04

Tabelul 4.9 Rezultatele calculate ale testelor
D90w0m10 până la D90w12m10

densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644$ kg/m³

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	T (s)	D (-)	f_n (1/s)	v (m/s)	G_o (kN/m ²)
0	1639	3.22E-01	3.38E-02	3.11	1.73E+02	4.92E+04
3.8	1626	2.96E-01	3.22E-02	3.38	1.85E+02	5.77E+04
6	1638	2.89E-01	4.37E-02	3.47	1.83E+02	5.81E+04
7.8	1652	2.86E-01	3.39E-02	3.50	1.85E+02	6.13E+04
11.8	1637	3.09E-01	2.46E-02	3.23	1.68E+02	5.14E+04

Așa cum era de așteptat, frecvența naturală de oscilație prezintă valori ușor crescute în cazul epruvetelor mai dense, iar în același timp descrește în mod semnificativ odată cu creșterea masei greutăților adiționale. Cea mai mare diferență dintre valorile corespunzătoare situației cu densitate ridicată și, respectiv, cu densitate scăzută apare pentru cazul greutății adiționale de 2×5 kg (fig.4.19), cca 23 % în valori medii ale frecvenței naturale, și este de cca 21 % pentru cazul 2×10 kg și 10 % pentru cazul 0 kg. Scăderea frecvenței naturale de oscilație de la situația 0 kg masă adițională la situația 2×5 kg este de cca 46 %, și respectiv la situația 2×10 kg de cca 59 %, în timp ce scăderea frecvenței naturale de la situația 2×5 kg la situația 2×10 kg este de cca 24 %.

Analizând influența conținutului de apă, se observă că cel mai semnificativ efect asupra frecvenței naturale de oscilație are loc pentru situația 0 kg masa adițională, deci pentru cel mai ridicat nivel atins al frecvenței. Se observă deasemenea că în general, pentru majoritatea curbelor prezentate în figura 4.18, cele mai ridicate valori ale frecvenței naturale de oscilație apar pentru un procent redus al conținutului de apă, cca 4 %. Aceasta este o consecință a rigidizării nisipului datorită forțelor de capilaritate ce se dezvoltă mai bine în cazul unui conținut de apă relativ redus.

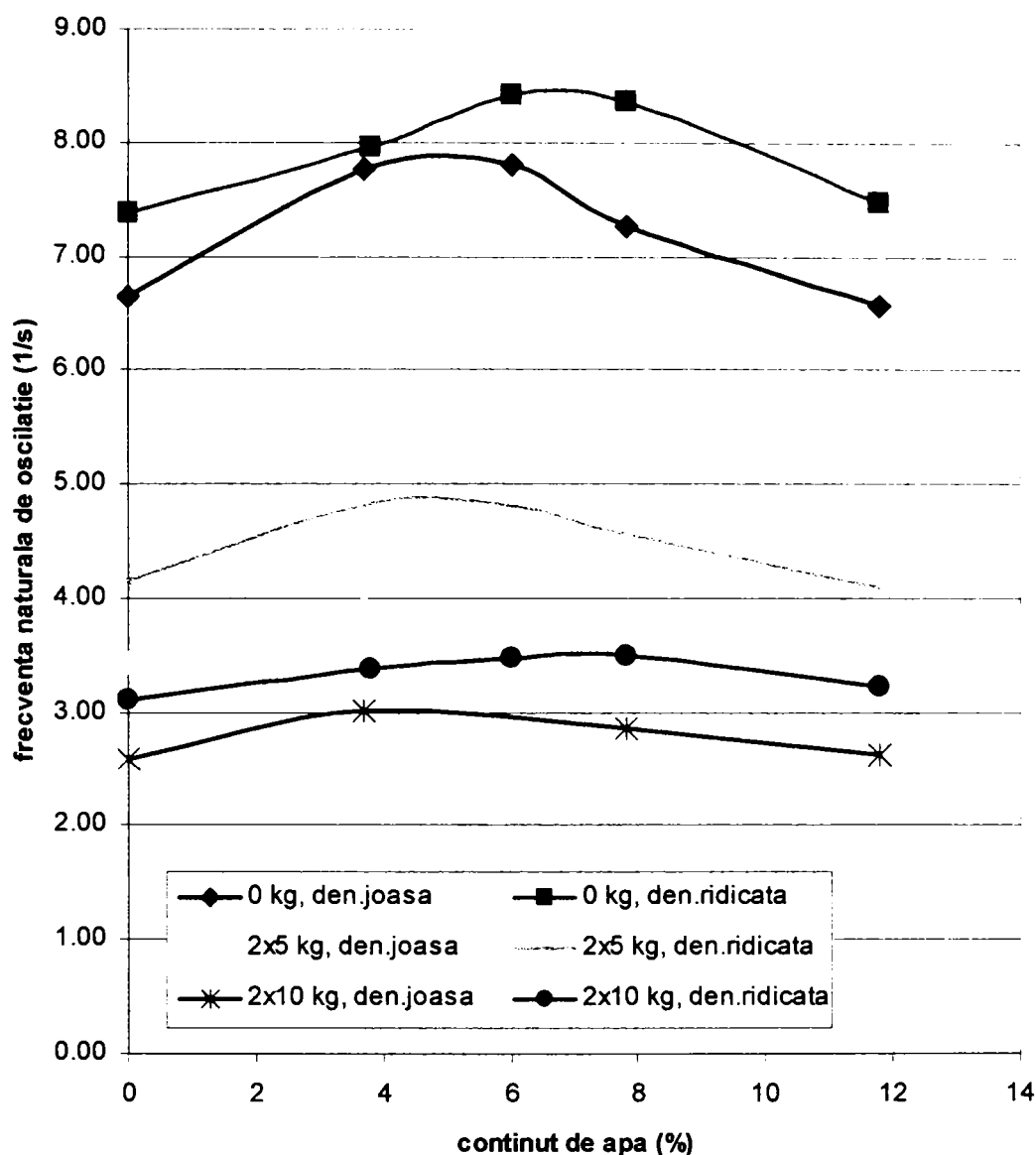


Figura 4.18 Variația frecvenței naturale de oscilație cu conținutul de apă

Cele mai joase valori ale frecvenței naturale de oscilație apar pentru nisipul complet uscat (0 % conținut de apă) sau pentru procentul cel mai mare considerat al conținutului de apă, cca 12 %. În ceea ce privește valorile obținute pentru situațiile 0 kg și 2x10 kg, cazul densității efective ridicate, mult ridicate față de valorile corespunzătoare celorlalte patru situații (vezi fig.4.18), este posibil că rezultatele testelor nu au fost destul de corecte. Ținând cont de această rezervă, se poate totuși observa că frecvența naturală tinde să prezinte un maxim în dreptul procentului de 4 % al conținutului de apă.

În ceea ce privește raportul față de situația epruvetei complet uscate, s-a obținut că în cazul 0 kg masă adițională, frecvența naturală prezintă o creștere de cca 7.7 %, pentru densitate ridicată, și de cca 16.9 %, pentru densitate scăzută, iar în cazurile 2x5 kg și 2x10 kg această creștere este de 16.4 % și 13.9 %, respectiv 8.7 % și 16.2 %. Figura 4.20 prezintă nivelurile la care se ridică raportul dintre frecvența naturală maximă și

frecvența naturală corespunzătoare stării complet uscată, în cele trei cazuri ale greutăților adiționale.

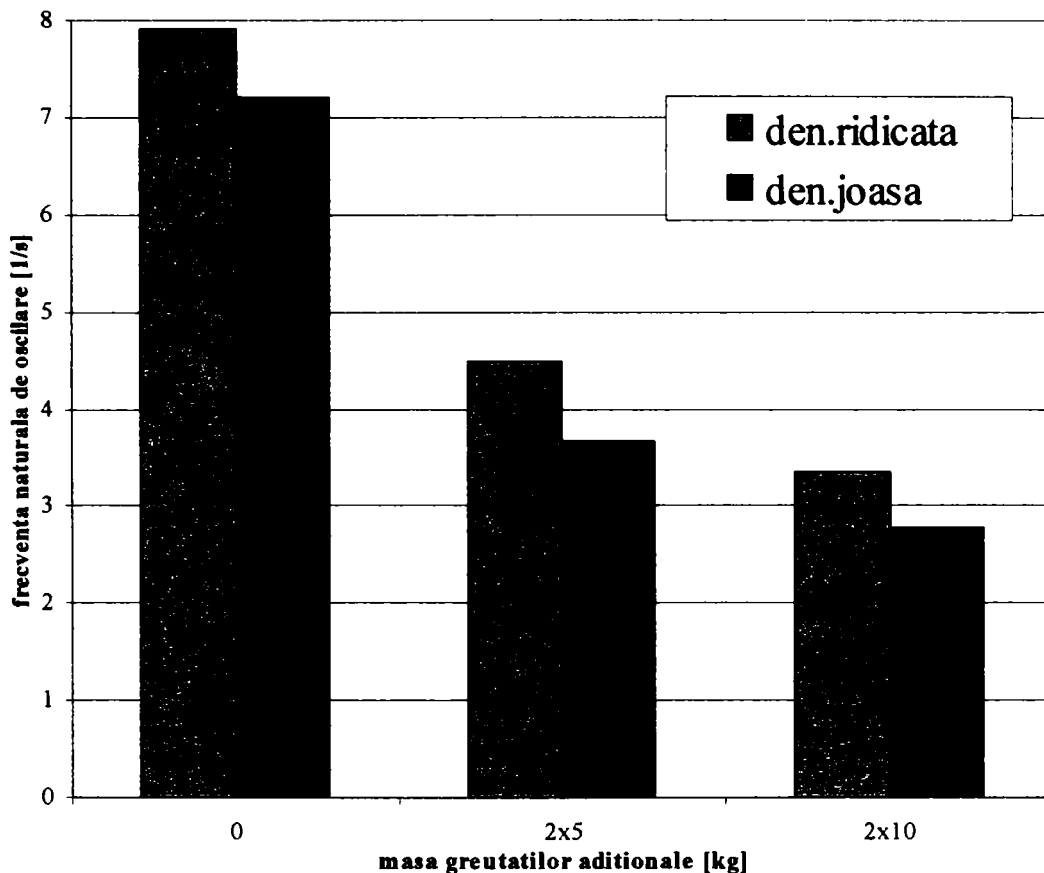


Figura 4.19 Frecvența naturală de oscilație medie

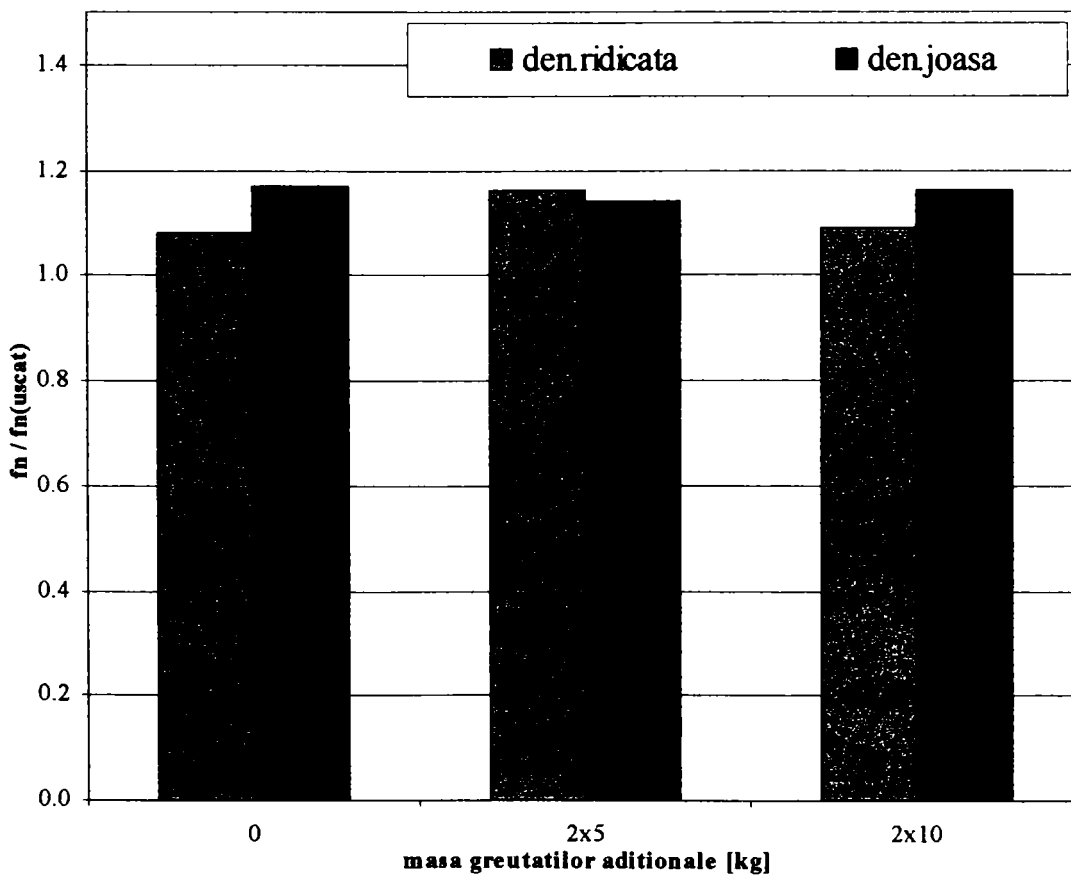


Figura 4.20 Nivelul frecvenței naturale în raport cu valoarea corespunzătoare stării complet uscate

Urmând aceeași comportare ca și frecvența naturală de oscilație, dar dovedind o influență mai pronunțată, variația modulului de rezistență la tăiere cu conținutul de apă, obținută pentru diversele niveluri ale masei greutăților adiționale, este prezentată în figura 4.21. Astfel, se observă că modulul de rezistență la tăiere crește, pentru o anumită masă a greutăților adiționale, cu densitatea epruvetei. Se remarcă deasemenea tendința de aplatizare a curbelor pentru valori joase ale densității și odată cu creșterea masei greutății adiționale. Aceasta înseamnă că pentru frecvențe ridicate, influența conținutului de apă asupra modulului de rezistență la tăiere devine mai importantă.

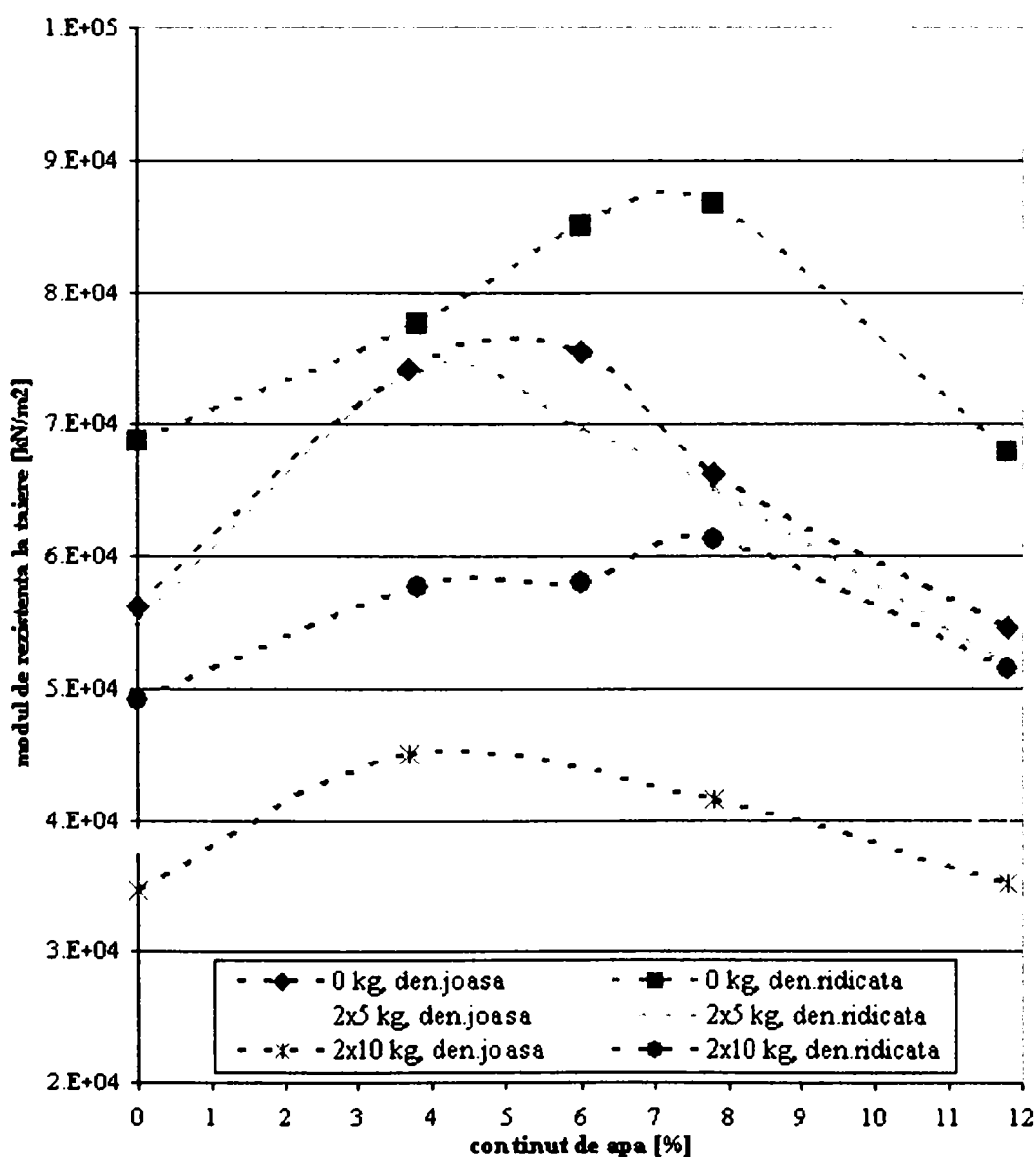


Figura 4.21 Variația modulului de rezistență la tăiere maxim cu conținutul de apă

În același timp, s-a obținut că modulul de rezistență la tăiere prezintă în general un maxim pentru procentul relativ redus al conținutului de apă, de cca 4 %. Ținând cont de faptul că pentru prima parte a relației de legătură $G_o - w$ (între situațiile corespunzătoare stării complet uscată și cea

a unui conținut de apă de 4 %) nu au fost efectuate măsurători, și că rezultatele corespunzătoare densității ridicate, cazurile 0 și 2×10 kg, nu urmează tendința generală a curbelor, nu se poate spune dacă pentru materialul considerat nu există o creștere și mai pronunțată a modului de rezistență, la valori ale conținutului de apă în intervalul 2 ÷ 3 %. În intervalul 4 ÷ 12 %, modulul de rezistență descrește în general cu conținutul de apă. Valorile modului de rezistență corespunzătoare celui mai ridicat procent considerat al conținutului de apă (cca 12 %), sunt aproape egale cu valorile determinate pentru starea complet uscată. Nivelurile medii ale modului de rezistență, respectiv creșterea acestuia pentru procentul conținutului de apă de cca 4 %, relativ la valoarea corespunzătoare stării complet uscate, sunt prezentate în figurile 4.22 și 4.23.

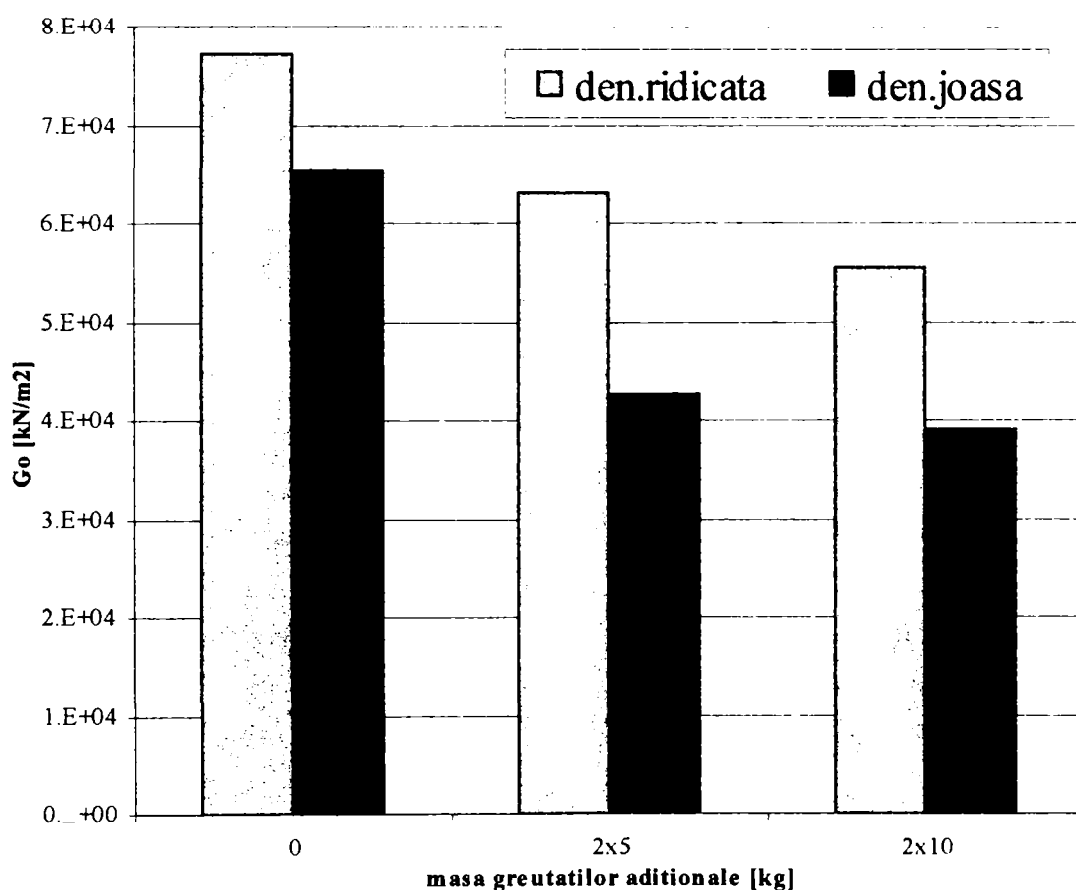


Figura 4.22 Modulul de rezistență la tăiere mediu

Considerând valorile medii, diferența dintre situația corespunzătoare densității joase și cea a densității ridicate, este de cca 18 %, pentru cazul 0 kg masă adițională, cca 48 %, în cazul 2×5 kg, respectiv cca 42 %, în cazul 2×10 kg. Descreșterea medie a valorii modului de rezistență la tăiere față de cazul 0 kg masă adițională, este de cca 25.7 % în cazul 2×5 kg, respectiv de cca 33.7 % în cazul 2×10 kg masă adițională.

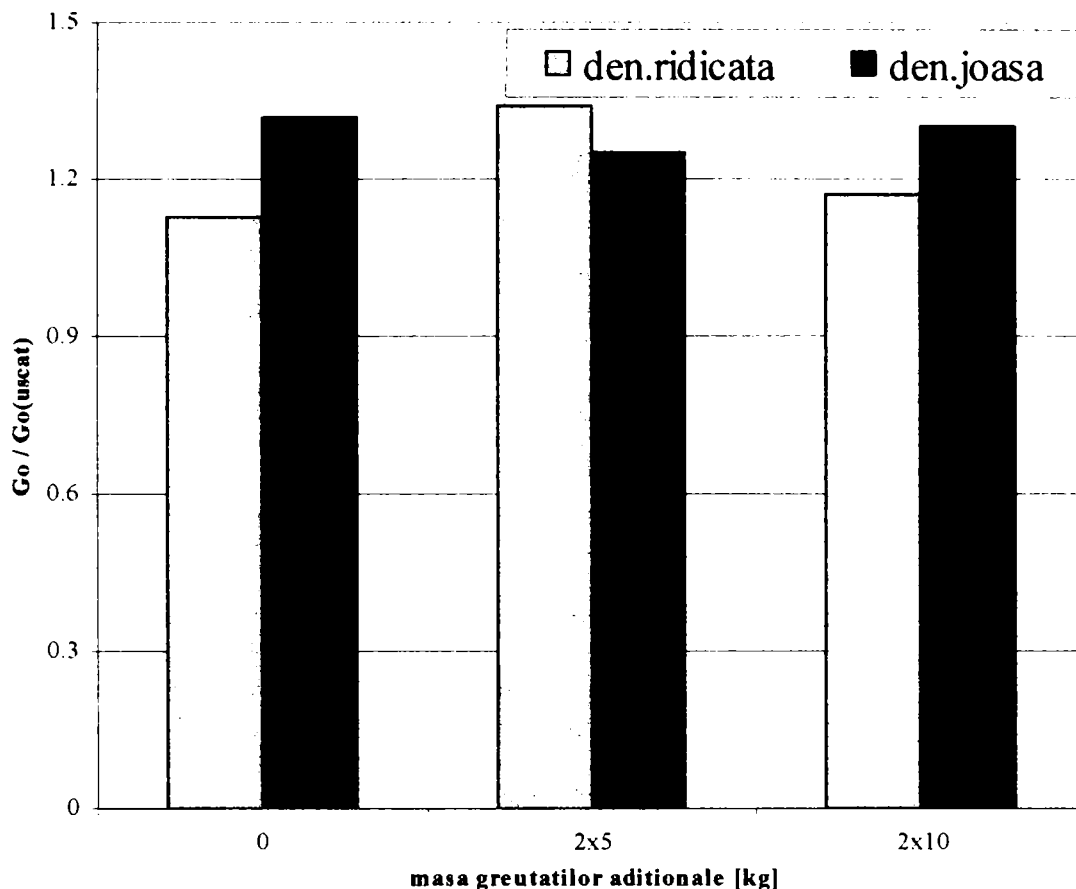


Figura 4.23 Nivelul modului de rezistență la tăiere maxim în raport cu valoarea corespunzătoare stării complet uscate

În raport cu situația corespunzătoare stării epruvetei complet uscate, modulul de rezistență la tăiere crește, în cazul 0 kg masă adițională, cu cca 12.9 % pentru nivelul ridicat al densității, respectiv cu cca 32 % pentru nivelul scăzut al densității, iar în cazurile 2x5 kg și 2x10 kg masă adițională, aceste creșteri sunt 34.5 % și 25.3 %, respectiv 17.3 % și 29.7 %. Figurile 4.24 și 4.25 prezintă variația raportului $G_o/G_{o(uscata)}$ cu conținutul de apă și masa greutății adiționale, pentru cele două situații considerate ale densității epruvetei de nisip.

În situația densității joase, cea mai mare valoare a raportului $G_{o(4\%)} / G_{o(uscata)}$ este de cca 1.34, și apare pentru cazul 0 kg masă adițională. Următoarele valori în situația densității joase, sunt 1.3, apărând pentru cazul 2x10 kg masă adițională, și respectiv 1.25, pentru cazul 2x5 kg. În situația densității ridicate, cea mai mare valoare a raportului $G_{o(4\%)} / G_{o(uscata)}$ apare pentru cazul 2x5 kg masă adițională (cca 1.34), dar este posibil ca rezultatele obținute pentru celelalte două cazuri să nu fie destul de precise.

Comportarea modului de rezistență la tăiere cu frecvența de oscilare este prezentată în figura 4.26. Curbele polinomiale de variație generală considerate în figură, corespund rezultatelor obținute în cazul domeniului frecvențelor relativ joase, dezvoltate în testele efectuate. Totuși, numai pe baza acestor rezultate, nu se poate spune dacă tendințele evidențiate se

mențin și pentru domeniul frecvențelor de operare al utilajelor de compactare cu cilindrii vibratorii, cuprins între 20 și 40 1/s.

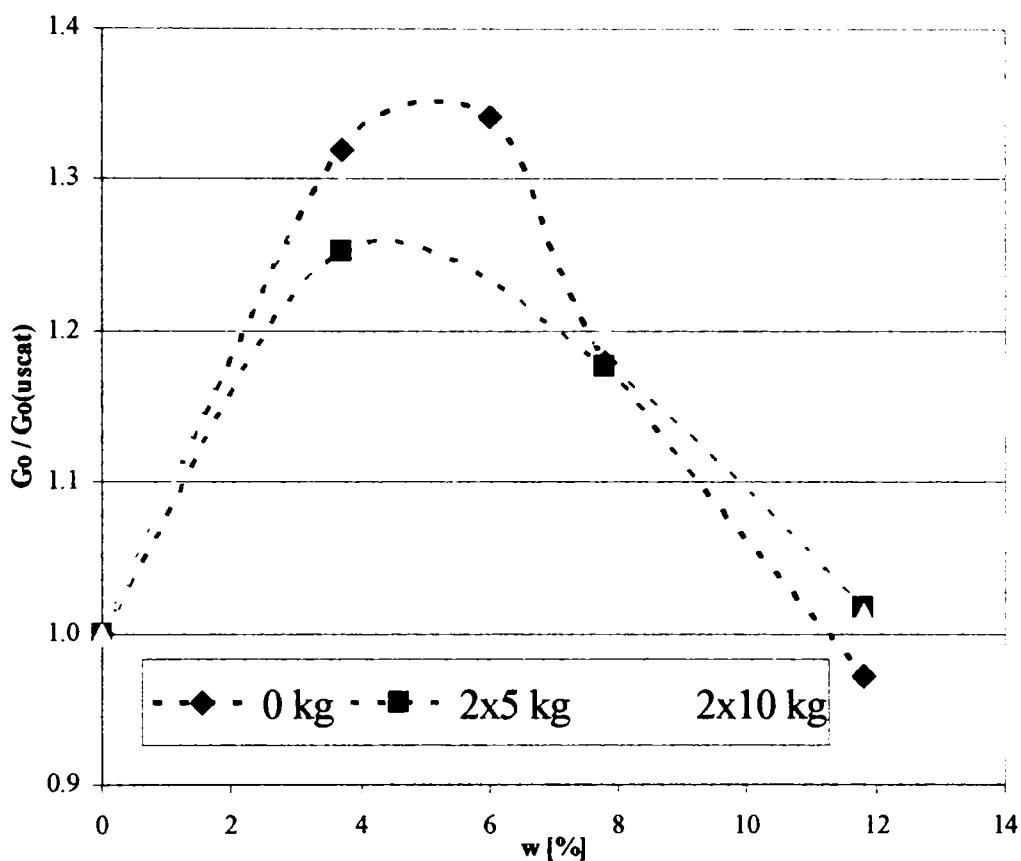


Figura 4.24 Variația modului de rezistență la tăiere adimensional cu conținutul de apă, situația desnității scăzute

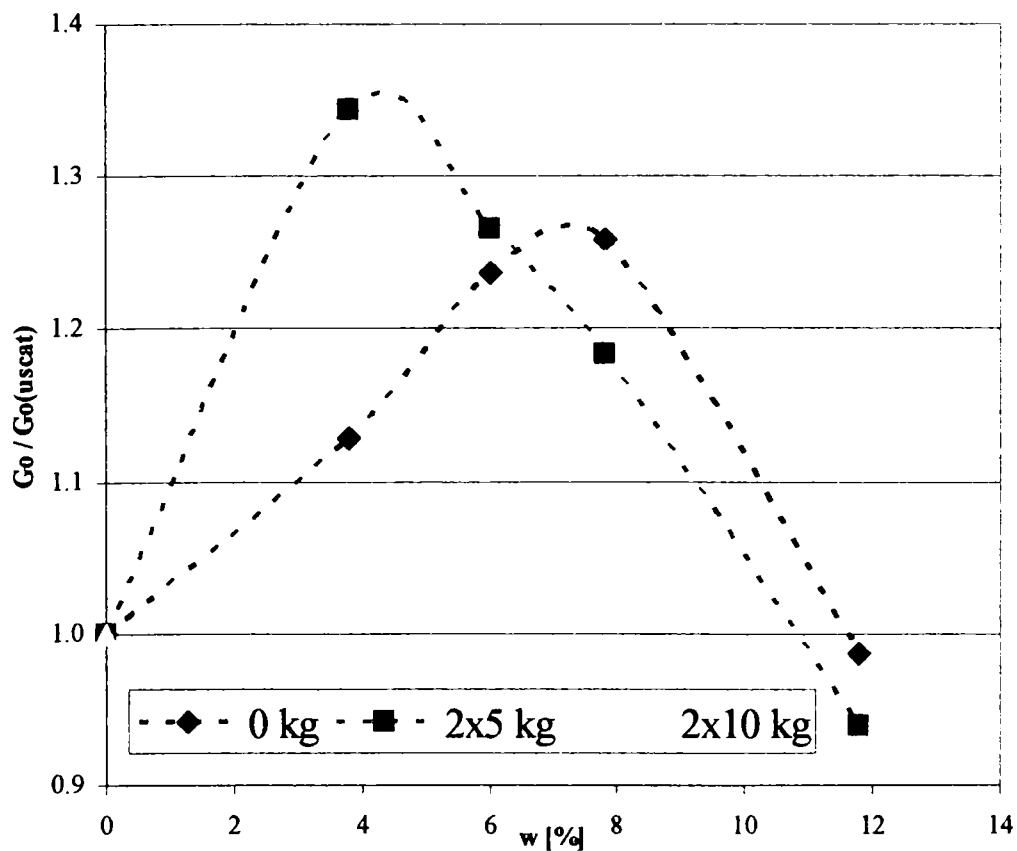


Figura 4.25 Variația modului de rezistență la tăiere adimensional cu conținutul de apă, situația desnității ridicate

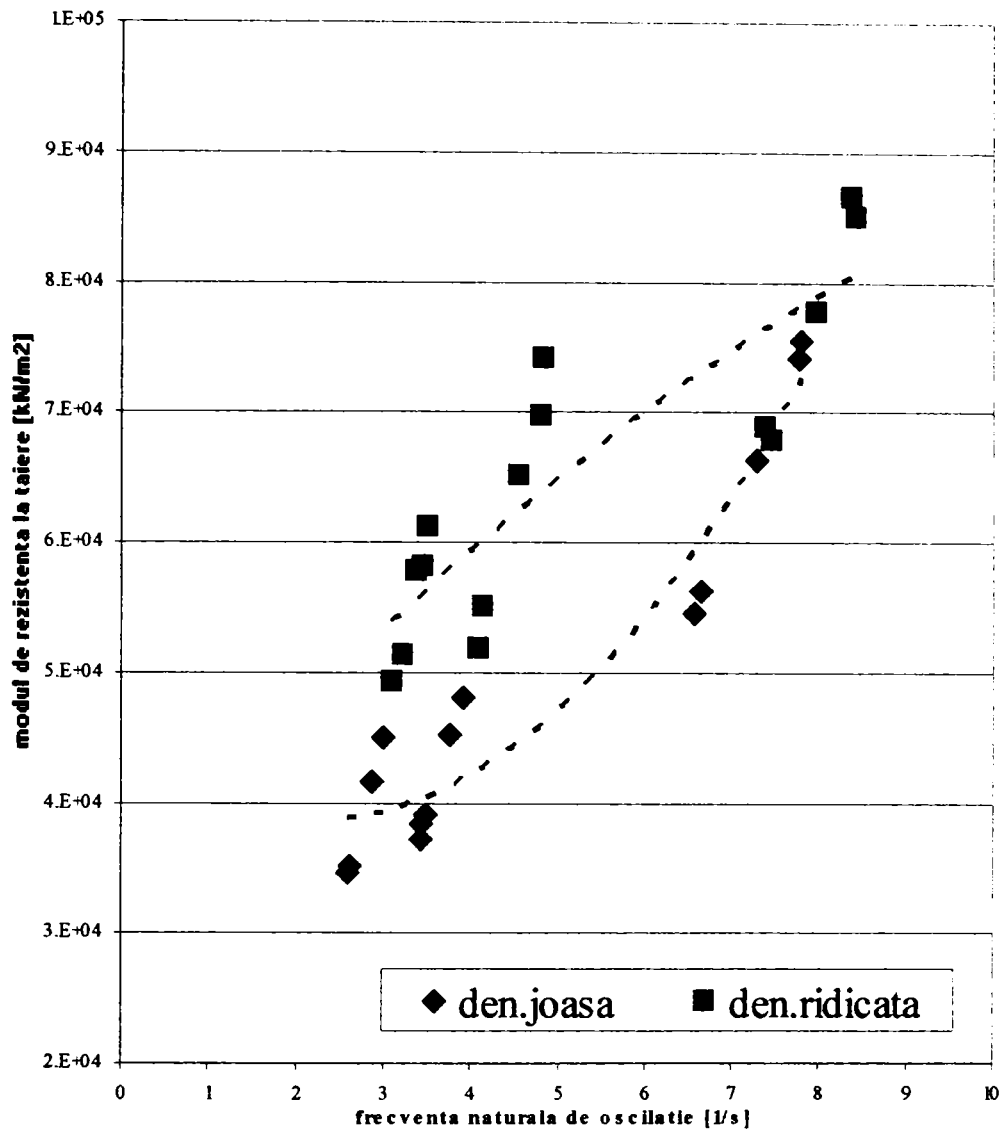


Figura 4.26 Relația de legătură $G_o - f_n$, obținută pe baza rezultatelor testelor

4.4 Compararea rezultatelor obținute cu valori calculate prin modelul empiric *Wu et.al. (1984)*

Pentru verificarea valorilor modului de rezistență la tăiere obținute pe baza rezultatelor testelor VTL efectuate, din literatura de specialitate studiată a fost ales modelul empiric *Wu et.al. (1984)*. Acest model (vezi paragraful 3.4), stabilit pentru materiale granulare fine, necoezive, consideră ca parametrii cu rol important în fenomenul acțiunii dinamice: presiunea medie efectivă, gradul de saturare și granulometria materialului. Având în vedere că gradul de saturare se calculează pe baza următoarei relații, în funcție de densitatea efectivă a materialului și procentul conținutului de apă (vezi anexa A):

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = w \frac{\rho_d \rho_s}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)} \quad (\%)$$

se poate spune că modulul de rezistență la tăiere calculat prin modelul *Wu et.al. (1984)* depinde și de densitatea materialului și conținutul de apă al acestuia.

În calculele efectuate, densitatea scheletului materialului granular a fost considerată $\rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$, iar densitatea apei $\rho_w = 1 \text{ gr/cm}^3$.

În tabelele 4.10 până la 4.15, valorile modului de rezistență determinate de rezultatele testelor sunt comparate cu valori calculate pentru aceleași condiții ale materialului, prin intermediul modelului empiric menționat mai sus. Expresia modului de rezistență la tăiere, dezvoltată în model, este următoarea (relația 3.40):

$$G_{o''wu} = (1 + H)G_{o(uscat)}$$

în care $G_{o(uscat)}$ este modulul de rezistență la tăiere corespunzător stării complet uscate a materialului, iar H este un parametru ce depinde de gradul de saturare optim și de valoarea maximă a raportului $(G_\sigma / G_{\sigma(uscat)})_{max}$.

Valoarea de referință a modului de rezistență corespunzător stării uscate $G_{o(uscat)}$ a fost considerată cea obținută pe baza testelor VTL efectuate asupra epruvetelor cu un conținut de apă de 0 %.

Pentru condițiile de presiune efectivă în care au fost efectuate testele, cca 46 kN/m^2 , și pentru un diametru $D_{10} = 0.053 \text{ mm}$, ce caracterizează materialul granular considerat, conform modelului *Wu et.al. (1984)* gradul de saturare optim (expresia 3.39) este

$$S_{r(opt)} = -6.51 \lg(D_{10}) + 1.5 = 9.79 \%,$$

iar creșterea maximă a modulului de rezistență în raport cu valoarea caracteristică stării uscate (figura 3.50) este

$$a = (G_o/G_{o(uscat)})_{max} = 1.38.$$

Parametrul H a fost calculat cu relația 3.41

$$H = (a-1)H_1H_2$$

în care

pentru $S_r = 0$, parametrul H_2 este nul (relația 3.42'), iar pentru celelalte valori ale gradului de saturare (în situația considerată în teste $S_r > S_{r(opt)}$) parametrii H_1 și H_2 s-au calculat (relațiile 3.42'')

$$H_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{100 - S_r}{100 - S_{r(opt)}} \right)^2 \quad \text{și} \quad H_2 = \sin \left[\frac{\pi(S_r + 50 - \frac{3}{2} S_{r(opt)})}{100 - S_{r(opt)}} \right] + 1$$

Variațiile modulului de rezistență obținut pe baza rezultatelor testelor, respectiv calculat prin modelul *Wu et.al (1984)*, în raport cu conținutul de apă, și pentru diversele niveluri ale masei greutateților adiționale (deci pentru diverse valori ale frecvenței naturale de oscilație), sunt prezentate în figurile 4.27 până la 4.29. Întrucât nu au fost efectuate teste corespunzătoare unui grad de saturare cuprins între 0 % și $S_{r(opt)}$, în graficele prezentate s-au considerat pentru comparație numai porțiunile descrescătoare ale curbelor $G_o \cdot w_u - w$, calculate prin modelul empiric.

Tabelul 4.10 Comparație rezultate, teste D84w0m0 până la D84w12m0

masa greutateții adiționale = 0 kg

densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S_r (%)	H (-)	$G_{o(VTL)}$ (kN/m ²)	$G_{o \cdot w_u}$ (kN/m ²)
0	1520	0.0	0.000	5.62E+04	5.62E+04
3.7	1533	13.5	0.348	7.42E+04	7.58E+04
6	1533	21.8	0.273	7.54E+04	7.16E+04
7.8	1518	27.7	0.221	6.63E+04	6.86E+04
11.8	1517	41.9	0.113	5.46E+04	6.26E+04

Tabelul 4.11 Comparație rezultate, teste D90w0m0 până la D90w12m0
densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S _r (%)	H (-)	G _{o(VTL)} (kN/m ²)	G _{o"wu"} (kN/m ²)
0	1639	0.0	0.000	6.88E+04	6.88E+04
3.8	1656	16.8	0.319	7.77E+04	9.07E+04
6	1638	25.7	0.238	8.51E+04	8.52E+04
7.8	1652	34.2	0.168	8.66E+04	8.03E+04
11.8	1637	50.5	0.066	6.78E+04	7.33E+04

Tabelul 4.12 Comparație rezultate, teste D84w0m5 până la D84w12m5
masa greutății adiționale = 2×5 kg
densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S _r (%)	H (-)	G _{o(VTL)} (kN/m ²)	G _{o"wu"} (kN/m ²)
0	1520	0.0	0.000	3.84E+04	3.84E+04
3.7	1533	13.5	0.348	4.81E+04	5.18E+04
7.8	1518	27.7	0.221	4.52E+04	4.69E+04
11.8	1517	41.9	0.113	3.91E+04	4.28E+04

Tabelul 4.13 Comparație rezultate, teste D90w0m5 până la D90w12m5
densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S _r (%)	H (-)	G _{o(VTL)} (kN/m ²)	G _{o"wu"} (kN/m ²)
0	1639	0.0	0.000	5.51E+04	5.51E+04
3.8	1626	16.0	0.326	7.41E+04	7.30E+04
6	1638	25.7	0.238	6.98E+04	6.82E+04
7.8	1652	34.2	0.168	6.52E+04	6.43E+04
11.8	1637	50.5	0.066	5.18E+04	5.87E+04

Tabelul 4.14 Comparație rezultate, teste D84w0m10 până la D84w12m10
masa greutății adiționale = 2×10 kg
densitate efectivă joasă, $\rho_d \cong 1524 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S _r (%)	H (-)	G _{o(VTL)} (kN/m ²)	G _{o"wu"} (kN/m ²)
0	1520	0.0	0.000	3.47E+04	3.47E+04
3.7	1533	13.5	0.348	4.50E+04	4.68E+04
7.8	1518	27.7	0.221	4.16E+04	4.24E+04
11.8	1517	41.9	0.113	3.51E+04	3.86E+04

Tabelul 4.15 Comparație rezultate, teste D90w0m10 până la D90w12m10 densitate efectivă ridicată, $\rho_d \cong 1644 \text{ kg/m}^3$

w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S _r (%)	H (-)	G _{o(VTL)} (kN/m ²)	G _{o·w_a} (kN/m ²)
0	1639	0.0	0.000	4.92E+04	4.92E+04
3.8	1626	16.0	0.326	5.77E+04	6.52E+04
6	1638	25.7	0.238	5.81E+04	6.09E+04
7.8	1652	34.2	0.168	6.13E+04	5.75E+04
11.8	1637	50.5	0.066	5.14E+04	5.24E+04

Se observă că în general valorile obținute pe baza testelor sunt în bună corelație cu valorile calculate prin intermediul modelului empiric, cele mai importante excepții apărând pentru cazul densității relativ ridicate, în situațiile cu 0 kg, respectiv 2×10 kg masa greutății adiționale. Această comportare aparte față de tendința generală este dificil de explicat, fiind posibil să fie efectul unor deficiențe pe parcursul desfășurării testelor. În graficele prezentate, punctele care nu aparțin curbelor considerate reprezintă valori calculate pe baza rezultatelor testelor ce nu au îndeplinit condițiile dorite pentru parametrii considerați (densitate, conținut de apă).

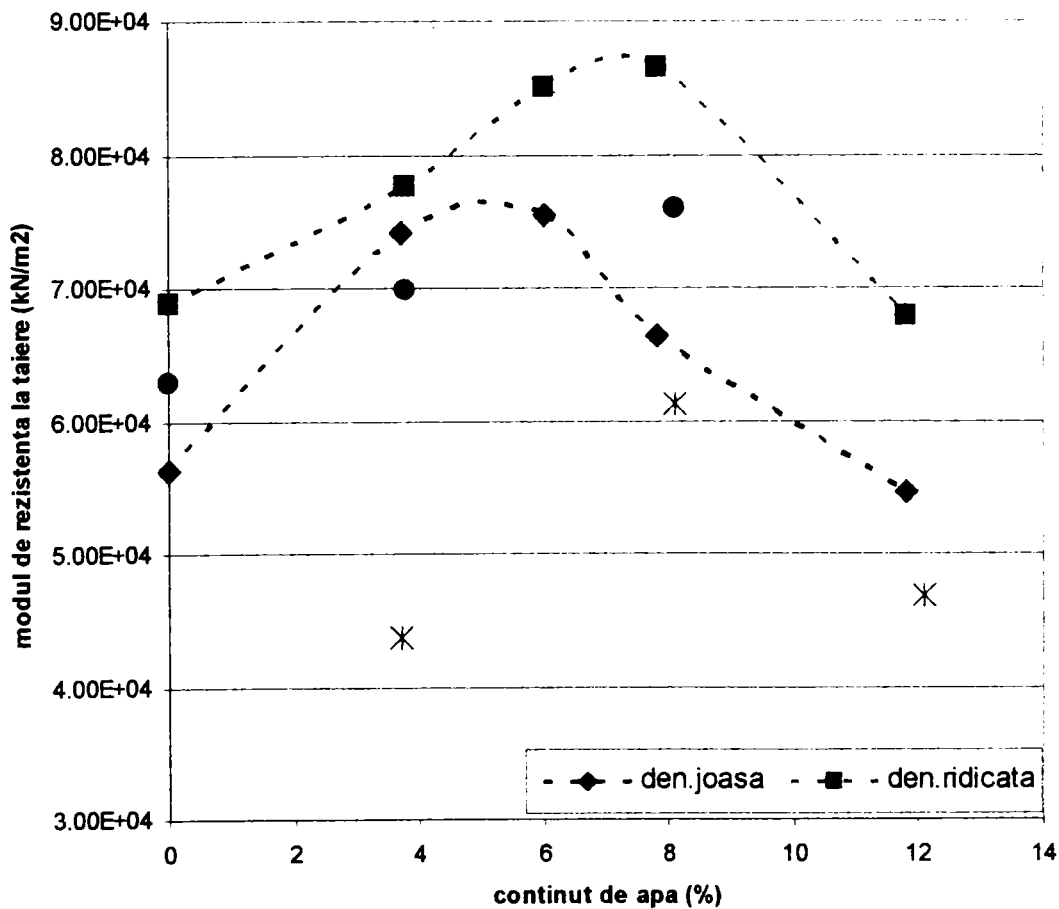
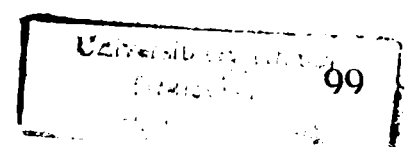


Figura 4.27 Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 0 kg masa greutăților adiționale



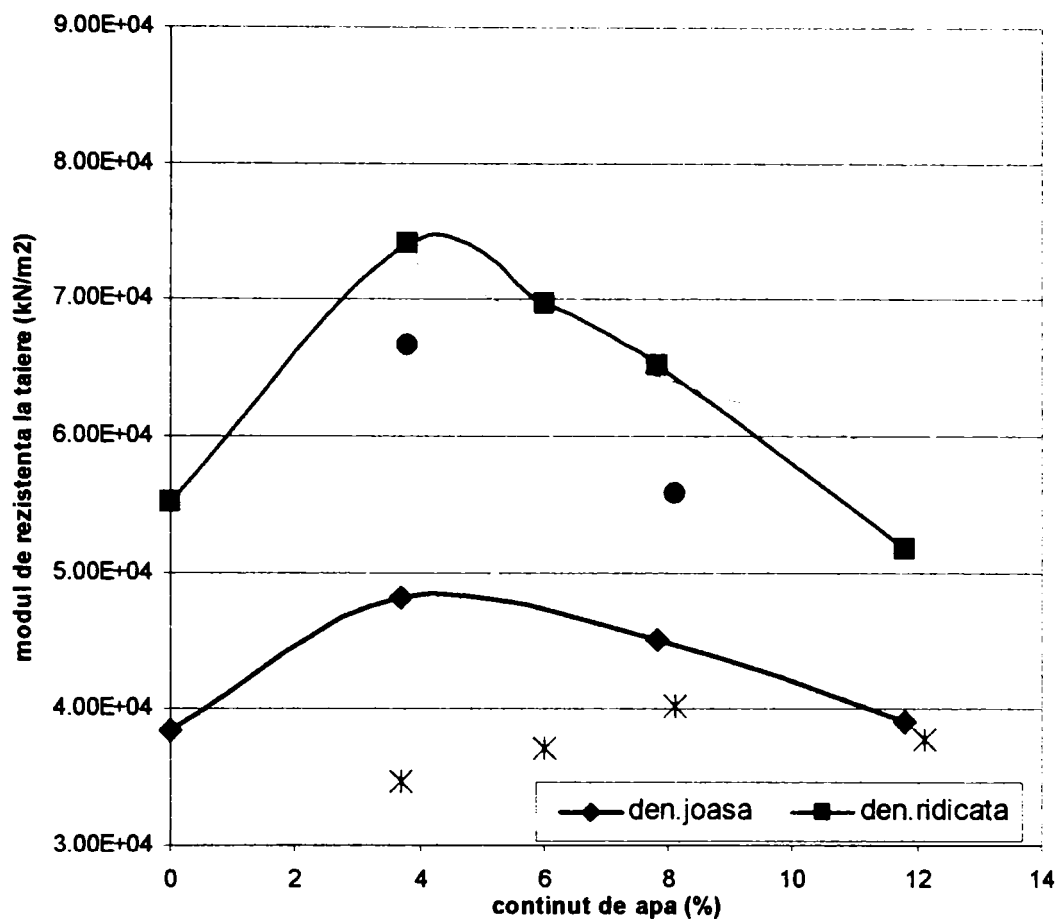


Figura 4.28 Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 2x5 kg masa greutăților adiționale

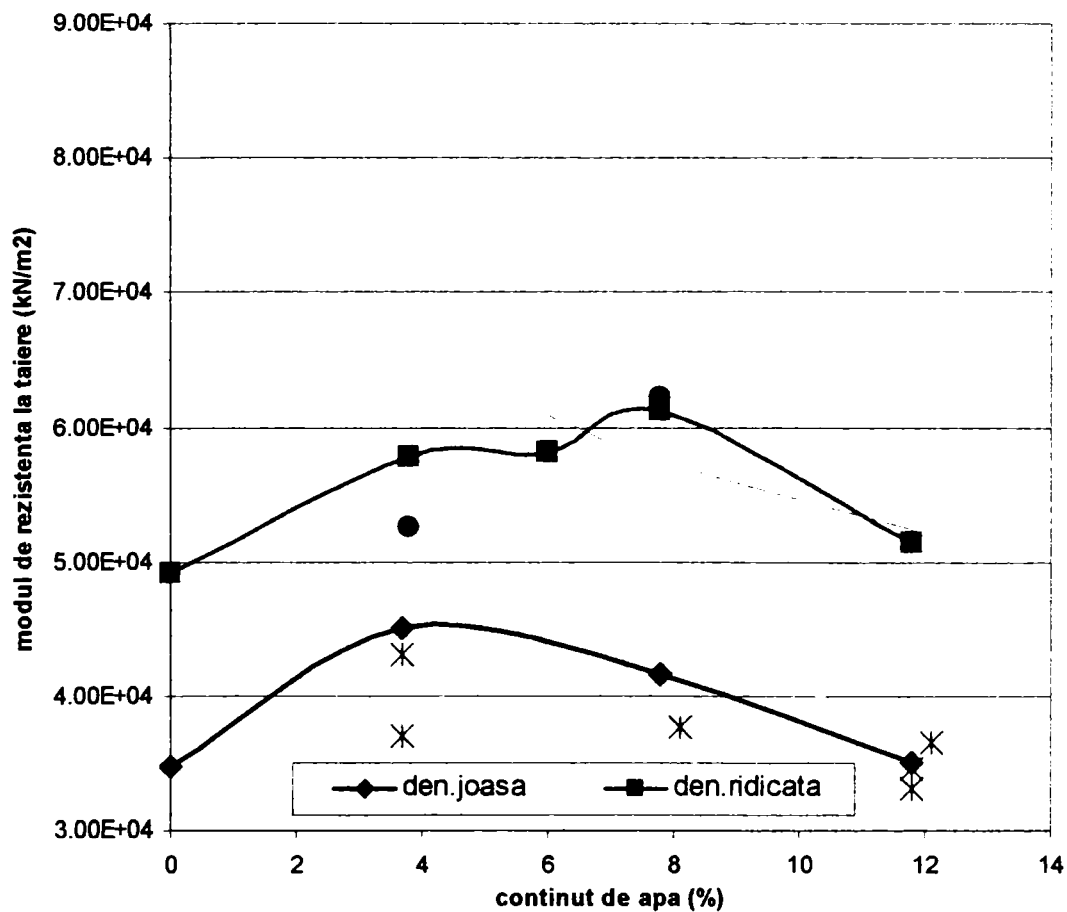


Figura 4.29 Comparație valori obținute pe baza testelor și valori calculate, 2x10 kg masa greutăților adiționale

Dacă aceleași variații sunt prezentate în funcție de gradul de saturare al materialului, datorită corelării dintre conținutul de apă și gradul de saturare, vârfurile celor două curbe (corespunzătoare cazurilor cu densitate joasă și respectiv cu densitate ridicată) apar ușor decalate (fig.4.30).

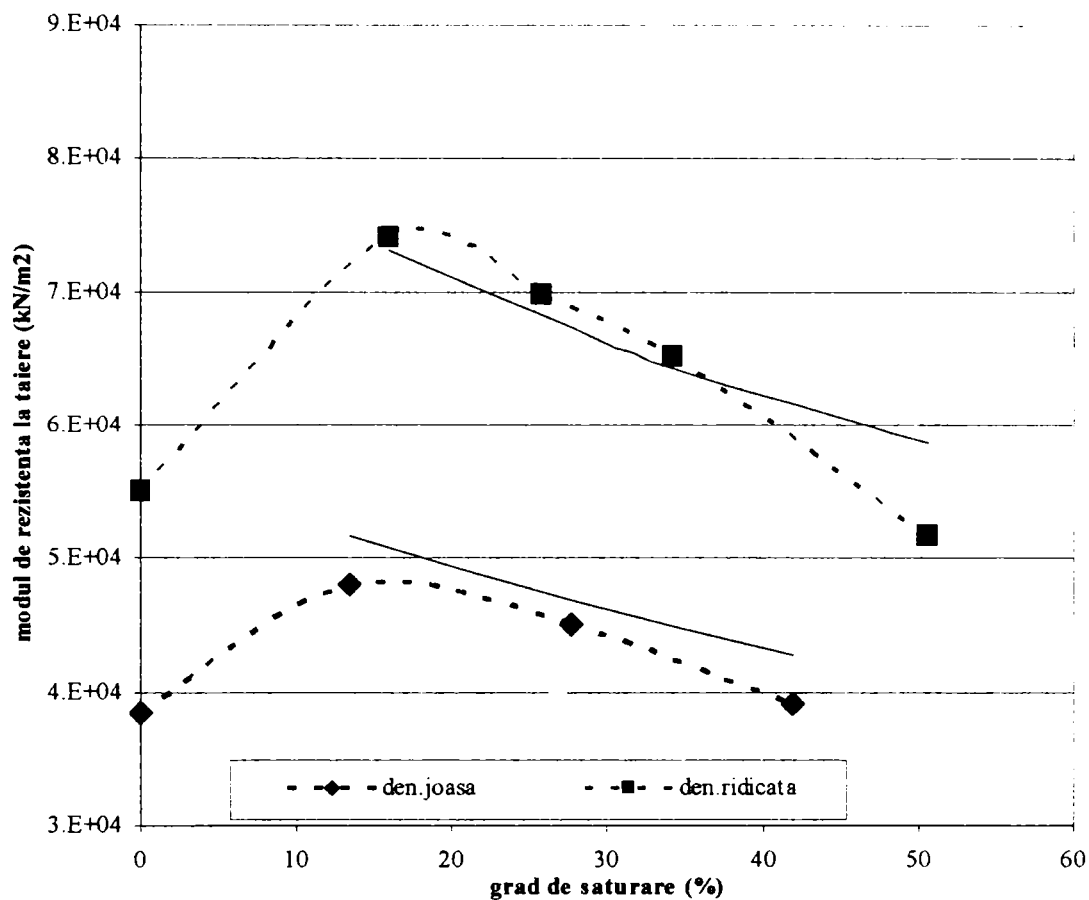


Figura 4.30 Relația $G_o - S_r$,
situația 2x5 kg masa greutăților adiționale

În concluzie, se poate spune că tendința de comportare generală a modului de rezistență la tăiere în raport cu parametrii considerați (conținut de apă, frecvența de oscilație, densitate efectivă), poate fi estimată pe baza rezultatelor testelor de vibrare prin torsiune liberă. Pentru a dezvolta un model empiric mai riguros, de estimare a modului de rezistență la tăiere dinamică, este necesară efectuarea unui număr sporit de teste, pentru mai multe niveluri ale conținutului de apă și densității efective, și în diverse condiții de presiune efectivă.

Capitolul 5**STABILIREA CORELAȚIEI ANALITICE
DINTRE PARAMETRUL CCC ȘI CONȚINUTUL
DE APĂ AL NISIPULUI**

În acest capitol se prezintă răspunsul sistemului material compactat – cilindru vibrator pe parcursul procesului de compactare, determinat pe cale analitică. Modelul matematic al cilindrului vibrator, prezentat în capitolul 3, a fost studiat pentru condițiile specifice unui utilaj de compactare ce lucrează asupra unui strat de nisip de tipul considerat în Capitolul 4 (prăfos, uniform gradat). Pentru a estima valorile unui parametru de compactare de tipul celui prezentat de sistemul Terrameter de Control Continuu al Compactării (relația 3.25), calculele prezentate în acest capitol sunt dezvoltate pentru a obține energia absorbită de către materialul compactat pe parcursul procesului de compactare, respectiv pentru a stabili relația acestui parametru în special față de conținutul de apă al materialului. Deasemenea este discutată variația energiei absorbite în raport cu densitatea în stare uscată a materialului compactat și cu frecvența de operare a utilajului vibrator.

În primul paragraf este prezentată dezvoltarea analitică a modelului matematic, atât pentru cazul unui sistem cu un grad de libertate cinematic, cât și pentru cazul sistemului cu două grade de libertate cinematică. Se face observația că studiul practic a fost realizat considerând materialul ca având o comportare elastică pe parcursul unui ciclu de oscilație, sub acțiunea încărcării dinamice dezvoltată de dispozitivul vibrator. Astfel, neglijând componenta plastică z_p a deformației, dezvoltarea pornește de la ecuațiile mișcării de tipul (3.20) și (3.3) în care $z_d = z_o$.

Pentru ambele tipuri de sistem, energia absorbită de către materialul compactat este obținută ca o funcție de amplitudinea cilindrului, de coeficienții de elasticitate și vâscozitate ai materialului compactat și de frecvența de vibrare a dispozitivului de acționare. În final este discutată influența acestor mărimi asupra răspunsului întregului sistem.

Cel de al doi-lea paragraf cuprinde aplicarea practică pentru un sistem material compactat – cilindru vibrator concret. Răspunsul sistemului pe parcursul procesului de compactare în raport cu creșterea conținutului de apă al materialului compactat este determinat considerând un utilaj de compactare de tipul CH-43 ce lucrează pe un strat depus de nisip prăfos. Calculele au fost desfășurate pentru aceleași două valori ale densității în stare uscată, ce au fost considerate la determinarea în laborator a modului de rezistență la tăiere pentru un material granular fin (capitolul 4). Variația modulului de rezistență la tăiere cu conținutul de apă al

materialului compactat a fost stabilită pe baza modelului empiric *Wu et.al. (1984)*, în care valorile modului de rezistență la tăiere pentru starea perfect uscată au fost considerate cele stabilite pe baza testelor de laborator efectuate (paragraful 4.3).

Rezultatele calculelor arată că, printre diverșii parametri implicați în fenomenul studiat, variația conținutului de apă a materialului compactat determină un efect important asupra energiei absorbite și în consecință asupra eficienței procesului de compactare.

5.1 Studiul analitic al modelului matematic considerat pentru sistemul material compactat – cilindru vibrator

5.1.1 Cazul sistemului considerat cu un grad de libertate cinematică

Dacă se consideră situația în care cuplarea cilindrului vibrator la cadrul de susținere este realizată în mod special, astfel încât valorile coeficienților de elasticitate și vâscozitate de transmisie să poată fi neglijate (k_1 și $c_1 \cong 0$), sistemul material compactat – cilindru vibrator poate fi modelat ca un sistem forțat și cu vâscozitate, cu un grad de libertate cinematică.

Luând în considerare forța dinamică de acționare de tip armonic, ecuația diferențială ce guvernează mișcarea sistemului este:

$$m_r \ddot{z} + c\dot{z} + kz = m_e e \omega^2 \sin \omega t \quad (5.1)$$

în care

$m_r = m_d + m_e + m_f$ reprezintă masa totală a modulului frontal al utilajului de compactare;

$m_e e \omega^2 \sin \omega t = F_o \sin \omega t = F_D$ reprezintă forța dinamică de acționare de amplitudine F_o și pentru frecvența de vibrație circulară ω ;

z reprezintă deplasarea verticală a cilindrului vibrator;

c și k reprezintă coeficienții de vâscozitate și respectiv de elasticitate ai materialului compactat;

$c\dot{z} + kz = F_s$ reprezintă forța de interacțiune material compactat – cilindru vibrator.

Întrucât componenta omogenă a soluției ecuației diferențiale dispare în timp foarte scurt de la începerea mișcării, pentru rezolvare în condițiile unei mișcări oscilatorii constante se va considera numai soluția particulară. Având în vedere tipul armonic al încărcării, soluția particulară se poate considera de următoarea formă deasemenea armonică:

$$z = z_p(t) = U \sin \omega t + V \cos \omega t \quad (5.2)$$

în care U și V sunt constante ce se obțin prin substituirea în ecuația diferențială a mișcării (5.1) a primei și a celei de a doua derivate a deplasării z . Astfel, cele două constante se obțin:

$$U = \frac{\frac{F_o}{k} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2D \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad \text{și} \quad V = -\frac{\frac{F_o}{k} 2D \frac{\omega}{\omega_n}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2D \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (5.3)$$

Dacă se consideră $z(t) = U \sin \omega t + V \cos \omega t = \sqrt{U^2 + V^2} \sin(\omega t - \varphi)$, în care

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-V}{U} = \operatorname{arctg} \frac{2D \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}$$

reprezintă defazajul deplasării față acționare,

soluția pentru ecuația diferențială 5.1 se obține:

$$z(t) = \frac{F_o \sin(\omega t - \varphi)}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2D \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5.4)$$

În expresia 5.4 au fost introduse $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_r}}$ și $D = \frac{c}{2m_r \omega_n}$, frecvența naturală circulară și raportul de vâscozitate caracteristice unui sistem cu un grad de libertate cinematic.

Amplitudinea deplasării verticale a cilindrului vibrator se notează:

$$Z = \frac{F_o}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2D \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5.5)$$

și deci expresia funcției deplasare se scrie:

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \varphi) \quad (5.4')$$

Viteza și respectiv accelerația mișcării pe verticală a cilindrului vibrator se obțin:

$$\dot{z}(t) = Z\omega \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{și} \quad \ddot{z}(t) = -Z\omega^2 \sin(\omega t - \varphi) = -z(t)\omega^2 \quad (5.6)$$

Energia absorbită de către materialul compactat, după cum este de altfel măsurată prin intermediul dispozitivului Terrameter de Control Continuu al Compactării, se poate calcula prin însumarea pe parcursul unei perioade $T = \frac{2\pi}{\omega}$ a produsului dintre forța de interacțiune material compactat – cilindru vibrator ($c\dot{z}_d + kz_d = F_s$) și viteza mișcării pe verticală a cilindrului:

$$W = \int_0^T (c\dot{z} + kz) \dot{z} dt \quad (5.7)$$

Dacă în această expresie se substituie $z = U \sin \omega t + V \cos \omega t$ și $\dot{z} = U\omega \cos \omega t - V\omega \sin \omega t$, prin integrare se ajunge la:

$$W = c\omega\pi(U^2 + V^2) = \frac{c}{k} F_o Z\omega\pi \quad (5.7')$$

5.1.2 Cazul sistemului considerat cu două grade de libertate cinematică

Ecuațiile diferențiale ce guvernează mișcările cilindrului și respectiv a cadrului de susținere pentru cazul modelului matematic general al sistemului material compactat – cilindru vibrator, sunt:

$$\begin{aligned} m_r \ddot{z}_d + (c + c_t) \dot{z}_d - c_t \dot{z}_f + (k + k_t) z_d - k_t z_f &= m_e e \omega^2 \sin \omega t \\ m_f \ddot{z}_f - c_t \dot{z}_d + c_t \dot{z}_f - k_t z_d + k_t z_f &= 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

în care

$m_r = m_d + m_e$ și m_f sunt masele cilindrului și a cadrului de susținere;

$m_e e \omega^2 \sin \omega t \equiv F_o \sin \omega t \equiv F_D$ reprezintă forța dinamică de acționare de amplitudine F_o și cu frecvența circulară de vibrație ω ;

z_d și z_f reprezintă deplasările pe verticală a cilindrului și a cadrului de susținere;

c și k reprezintă coeficienții de vâscozitate și respectiv de elasticitate ai materialului compactat;

c_t și k_t reprezintă coeficienții de vâscozitate și respectiv de elasticitate ce caracterizează sistemul de susținere a cilindrului.

Considerând starea de mișcare oscilatorie constantă, corespunzătoare situației în care partea omogenă a soluției a dispărut, se pot adopta următoarele forme armonice pentru funcțiile deplasare ale cilindrului și respectiv cadrului de susținere (soluții particulare):

$$z_d(t) \equiv U_d \sin \omega t + V_d \cos \omega t \quad \text{și} \quad z_f(t) \equiv U_f \sin \omega t + V_f \cos \omega t \quad (5.9)$$

în care U_d , V_d , U_f și V_f sunt constante ce se obțin prin substituirea în sistemul ecuațiilor diferențiale (5.8) a derivatelor de primul și al doi-lea ordin a funcțiilor (5.9). Aceste constante sunt soluțiile următorului sistem matriceal:

$$\begin{bmatrix} -m_r \omega^2 + k + k_t & -k_t & -(c + c_t) \omega & c_t \omega \\ -k_t & -m_f \omega^2 + k_t & c_t \omega & -c_t \omega \\ (c + c_t) \omega & -c_t \omega & -m_r \omega^2 + k + k_t & -k_t \\ -c_t \omega & c_t \omega & -k_t & -m_f \omega^2 + k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_f \\ V_d \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_o \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Funcțiile (5.9) se pot pune sub următoarea formă:

$$\begin{aligned} z_d(t) &= U_d \sin \omega t + V_d \cos \omega t = \sqrt{U_d^2 + V_d^2} \sin(\omega t - \varphi_d) \\ z_f(t) &= U_f \sin \omega t + V_f \cos \omega t = \sqrt{U_f^2 + V_f^2} \sin(\omega t - \varphi_f) \end{aligned} \quad (5.9')$$

în care unghiurile de defazaj sunt:

$$\varphi_d = \arctg \frac{-V_d}{U_d} \quad \text{și} \quad \varphi_f = \arctg \frac{-V_f}{U_f} \quad (5.11)$$

Amplitudinea mișcării pe verticală a cilindrului se notează:

$$Z_d = \sqrt{U_d^2 + V_d^2} \quad (5.12)$$

Așa cum a fost considerat și în cazul sistemului cu un grad de libertate cinematică, energia absorbită de materialul compactat se calculează prin integrala (5.7) efectuată pe parcursul unei perioade T . Prin substituirea expresiilor deplasării și a vitezei mișcării, $z_d = U_d \sin \omega t + V_d \cos \omega t$ și $\dot{z}_d = U_d \omega \cos \omega t - V_d \omega \sin \omega t$, respectiv prin efectuarea integrării, se obține:

$$W = c\omega\pi(U_d^2 + V_d^2) = c\omega\pi Z_d^2 \quad (5.13)$$

5.1.3 Studiul analitic al comportării deplasării verticale și energiei absorbite

Influența caracteristicilor materialului granular compactat asupra deplasării verticale a cilindrului vibrator și în consecință asupra energiei absorbite se exercită prin intermediul coeficienților de elasticitate și respectiv vâscozitate. Așa cum au fost stabilite pe baza modelului conului elastic semi-infinit (capitolul 3, relațiile 3.13'), expresiile acestor coeficienți sunt:

$$k = \frac{G}{1-\nu}(3.1a^{0.75}b^{0.25} + 1.6b) \quad \text{și} \quad c = 4ab\sqrt{2G(1+\nu)\rho_d \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$$

în care G reprezintă modulul maxim de rezistență la tăiere pentru nisipul încărcat dinamic, ν este coeficientul lui Poisson al materialului granular, a este jumătate din lățimea cilindrului, $b = \sqrt{2rz - z^2}$ este jumătate din amprenta cilindrului, iar r este raza cilindrului.

Se face observația că deși b este o funcție de deplasarea z a cilindrului, având în vedere că variația sa este foarte mică, în calcule va fi considerat drept o constantă. Lățimea amprentei cilindrului se determină printr-un calcul succesiv din tasarea elastică a cilindrului sub acțiunea greutății proprii: $z_o k = m_r g$. Presupunând inițial o valoare $b_o = 10$ cm, de

exemplu, tasarea elastică se poate calcula $z_o = \frac{m_r g(1-\nu)}{G(3.1a^{0.75}b_o^{0.25} + 1.6b_o)}$, iar apoi

jumătatea amprentei se verifică prin $b = \sqrt{2rz_o - z_o^2}$. Calculul se reia succesiv până când valoarea obținută pentru b la pasul $i+1$ este practic egal cu valoarea corespunzătoare pasului imediat anterior i .

Deasemenea se face observația că dacă se consideră că modulul la tăiere G nu se modifică datorită compactării nisipului pe parcursul unui ciclu de oscilație, înseamnă că cei doi coeficienți k și c sunt considerați constanți pentru anumite caracteristici ale materialului granular.

Pornind de la expresia coeficientului de elasticitate k , este clar că pentru un utilaj specific de compactare, variația acestei mărimi în funcție de conținutul de apă va urma aceeași variație cu cea a Modulului de rezistență la tăiere dinamică G .

În ceea ce privește coeficientul de vâscozitate, expresia acestuia se poate scrie:

$$c = 4ab(1+w)\rho_d v_s \sqrt{2 \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$$

unde modulul de rezistență la tăiere dinamică a fost considerat prin expresia $G = (1+w)\rho_d v_s^2$. În acest fel, pentru un anumit utilaj de compactare ce operează asupra unui material cu o anumită valoare a densității în stare uscată, și știind totodată că viteza de deplasare a undelor transversale variază doar foarte ușor cu conținutul de apă (vezi paragraful 4.3), se poate aprecia faptul că c va crește odată cu w .

Variația frecvenței naturale de vibrație a sistemului în raport cu conținutul de apă al materialului granular compactat, dată prin intermediul coeficientului de elasticitate k (vezi expresiile 3.5, respectiv 3.5'), va urma deasemenea variația modulului de rezistență la tăiere G . Cu toate acestea, întrucât în expresiile menționate coeficientul k intervine sub semnul radical (atât pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică, cât și pentru cel considerat cu un grad de libertate cinematică), intensitatea variației frecvenței naturale de oscilație este relativ redusă.

Influența coeficientului de elasticitate k asupra variației deplasării cilindrului cu conținutul de apă al materialului compactat, și ca urmare asupra variației energiei absorbite pe parcursul unui ciclu de oscilare, depinde de raportul dintre frecvența de operare a dispozitivului vibrator și frecvența naturală de oscilație a sistemului. În cazul sistemului cu un grad de libertate cinematică, această influență este studiată prin introducerea formulelor frecvenței naturale (3.5') și raportului de vâscozitate (4.10) în expresia amplitudinii deplasării (5.5). În acest fel se obține:

$$Z = \frac{F_o}{\sqrt{(k - m_r \omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} = \frac{F_o}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 m_r^2 + c^2 \omega^2}} \quad (5.14)$$

Atâta timp cât frecvența naturală de oscilație prezintă o valoare sub cea a frecvenței de operare a dispozitivului vibrator, creșterea lui ω_n cu conținutul de apă al materialului compactat va determina o scădere a radicalului din expresia (5.14), și deci o creștere a amplitudinii deplasării verticale cilindrului. În acest fel, prin aplicarea unei frecvențe de operare a dispozitivului vibrator mai mare decât frecvența naturală de oscilație a sistemului ($\omega > \omega_n$), variația deplasării verticale a cilindrului cu conținutul

de apă va urma variația modulului de rezistență la tăiere dinamică. Pentru situația în care $\omega < \omega_n$, variația lui Z cu conținutul de apă va fi fix inversă. Pentru acel nivel al conținutului de apă la care cele două frecvențe devin egale ($\omega = \omega_n$), amplitudinea deplasării verticale a cilindrului și respectiv energia absorbită de materialul compactat vor atinge valori maxime.

Indiferent de raportul celor două frecvențe de oscilație, atât amplitudinea deplasării cilindrului Z cât și energia absorbită de materialul compactat pe parcursul unui ciclu de oscilare W vor prezenta valori extreme pentru acel nivel al conținutului de apă la care modulul de rezistență prezintă valoarea sa maximă.

În ceea ce privește comportarea coeficienților de elasticitate și de vâscozitate cu densitatea în stare uscată a materialului granular considerat, se poate observa că atât k cât și c sunt direct proporționali cu ρ_d .

Ca o consecință, frecvența naturală de oscilație crește cu densitatea în stare uscată, relație foarte importantă în corelarea cu frecvența de operare a dispozitivului vibrator.

După cum a fost menționat, nivelul frecvenței naturale de vibrație relativ la cel al frecvenței de operare determină comportarea amplitudinii deplasării cilindrului și a energiei absorbite de materialul compactat. În cazul unui material cu densitate redusă, frecvența naturală poate prezenta o valoare sub cea a frecvenței de operare (dată) și atunci Z și W vor fi proporționale cu coeficientul de elasticitate k . În cazul unui material cu densitate mai ridicată, pentru o frecvență naturală ce prezintă valoare mai mare decât frecvența dată de operare, Z și W vor fi invers proporționale cu coeficientul k .

Luând în considerare influența frecvenței de operare asupra deplasării verticale a cilindrului și respectiv asupra energiei absorbite, poate fi indicată situația unui răspuns optim al sistemului la acțiunea de compactare. O valoare maximă a energiei absorbite de către materialul compactat poate fi atinsă prin modificarea frecvenței de operare corespunzător condițiilor date (conținut de apă, densitate în stare uscată).

5.2 Determinarea răspunsului unui sistem material compactat – cilindru vibrator

Calcululele au fost conduse pentru un utilaj de compactare de tipul CH-43 cu cilindru vibrator neted (Yoo și Selig, 1980) ce lucrează asupra unui strat depus de nisip prăfos uniform gradat. Caracteristicile geo-dinamice ale materialului compactat sunt prezentate în capitolul 4 unde sunt prezentate testele de laborator efectuate, precum și rezultatele acestora.

Parametrii considerați în calcule pentru utilajul de compactare prezintă următoarele valori:

- masa totală a modulului frontal al utilajului este

$$m_r = m_d + m_e + m_f = 4760 \text{ kg};$$

- masa cadrului de susținere a cilindrului vibrator este

$$m_f = 2040 \text{ kg};$$

- masa cilindrului vibrator, conținând și dispozitivul de vibrare, este

$$m_d + m_e = 2720 \text{ kg};$$

- lățimea cilindrului neted este $2a = 1.6 \text{ m}$;

- diametrul cilindrului neted este $2r = 1.2 \text{ m}$;

- frecvența de operare a dispozitivului vibrator, respectiv frecvența circulară, este $f = 25 \text{ Hz} \Rightarrow \omega = 2\pi f = 157.08 \text{ rad/s}$;

- mărimea forței dinamice dezvoltată de dispozitivul vibrator este

$$F_o = 85 \text{ kN};$$

- coeficientul de elasticitate ce caracterizează sistemul de susținere a cilindrului este $k_t = 4400 \text{ kN/m}$;

- coeficientul de vâscozitate ce caracterizează sistemul de susținere a cilindrului este $c_t = 4.4 \text{ kN.s/m}$.

În cazul în care se urmărește determinarea răspunsului sistemului considerat cu un grad de libertate cinematică, se consideră că cilindrul vibrator este perfect atașat cadrului de susținere. În consecință coeficienții de elasticitate și vâscozitate ce caracterizează sistemul de susținere a cilindrului neted se dispun pentru acest caz cu valoarea zero, iar masa cilindrului vibrator se dispune ca fiind egală cu masa întregului modul frontal al utilajului.

Nisipul compactat se consideră în două situații distincte în ceea ce privește densitatea în stare uscată. Pentru situația cu densitate mai mică s-a adoptat valoarea $\rho_d = 1524 \text{ kg/m}^3$, iar pentru situația cu stare mai densă s-a adoptat valoarea $\rho_d = 1644 \text{ kg/m}^3$. Se menționează faptul că cele două valori considerate pentru densitatea în stare uscată a materialului compactat corespund nivelurilor dispuse la epruvetele studiate prin testele de laborator efectuate în vederea determinării modulului de rezistență maxim la tăiere dinamică (capitolul 4).

Răspunsul sistemului material compactat – cilindru vibrator se va determina pentru un conținut de apă situat în intervalul stare complet uscată 0 % și 14 %, limita superioară a intervalului fiind deja deasupra procentului optim al conținutului de apă (12 %, stabilit pe baza testelor Proctor standard).

Comportarea modulului de rezistență maxim la tăiere dinamică G_o cu conținutul de apă al materialului granular fin a fost determinată pe baza modelului *Wu et.al. (1984)*, conform celor prezentate în paragraful 3.4. Valorile $G_{o(uscat)}$, corespunzătoare stării complet uscată și pentru cele două valori menționate ale densității, sunt dispuse cele obținute pe baza testelor de laborator efectuate la cea mai ridicată valoare a frecvenței naturale de oscilație (vezi paragraful 4.3, cazul cu 0 kg masă adițională pe brațul de acționare). Astfel, pentru situația valorii mai mici a densității în stare uscată se dispune $G_{o(uscat)} = 56200 \text{ kN/m}^2$, iar pentru situația materialului mai dens se dispune $G_{o(uscat)} = 68800 \text{ kN/m}^2$. Conform modelului *Wu et.al. (1984)*, raportul maxim $a = (G_o/G_{o(uscat)})_{max}$ a fost estimat pe baza figurii 3.50, în condițiile unei presiuni de circa 46 kN/m^2 , la 1.38.

Având în vedere că pentru nisipul adoptat $D_{10} = 0.053 \text{ mm}$, gradul de saturare optim se obține pe baza relației (3.39):

$$S_{r(opt)} = -6.5 \lg(D_{10}) + 1.5 = 9.79 \%$$

Coeficientul lui Poisson al nisipului se dispune $\nu = 0.33$.

Prima parte a calculelor desfășurate tabelar este dezvoltată comun pentru ambele tipuri de sistem considerate, cu unul respectiv cu două grade de libertate cinematică, dar distinct în funcție de valoarea densității în stare uscată, după cum urmează:

- se determină gradul de saturare în funcție de nivelul conținutului de apă din material, cu formula (apendix A)

$$S_r = w \frac{\rho_d \rho_s}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)}$$

- se calculează parametrii modelului empiric *Wu et.al. (relațiile 3.41, 3.42)*

$H = (a-1)H_1H_2$ în care

$$H_1 = 1 \text{ și } H_2 = \sin\left(\frac{\pi S_r}{2S_{r(opt)}}\right) \text{ pentru } S_r \leq S_{r(opt)}$$

$$H_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{100 - S_r}{100 - S_{r(opt)}} \right)^2 \text{ și } H_2 = \sin \left[\frac{\pi(S_r + 50 - \frac{3}{2}S_{r(opt)})}{100 - S_{r(opt)}} \right] + 1 \text{ pentru } S_r > S_{r(opt)}$$

- se determină modulul de rezistență la tăiere dinamică, cu formula (3.40)

$$G_o = (1 + H)G_{o(drv)}$$

- se determină jumătatea b a lățimii amprentei cilindrului neted considerând o tasare elastică sub greutatea statică a acestuia (conform celor prezentate în paragraful 5.1.3);

- se determină coeficienții de elasticitate și vâscozitate ai materialului compactat (conform relațiilor 3.13' stabilite pe baza modelului conului elastic semi-infinit prezentat în capitolul 3)

$$k = \frac{G}{1-\nu} (3.1a^{0.75}b^{0.25} + 1.6b) \quad \text{și} \quad c = 4ab \sqrt{2G(1+\nu)\rho_d \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$$

În continuare formulele de calcul pentru frecvența naturală de oscilație, pentru deplasarea pe verticală a cilindrului vibrator, respectiv pentru energia absorbită de materialul compactat, sunt diferite pentru cele două tipuri de sistem dinamic.

După cum a fost prezentat în paragrafele 3.1.3 și 5.1, formulele menționate sunt, pentru sistemul cu un grad de libertate cinematică

- frecvența naturală de oscilație se calculează cu

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_r}}$$

- amplitudinea deplasării pe verticală a cilindrului vibrator se calculează

cu

$$Z = \frac{F_o}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 m_r^2 + c^2 \omega^2}}$$

- energia absorbită de materialul compactat pe parcursul unui ciclu de oscilație se calculează cu

$$W = \frac{c}{k} F_o Z \omega \pi$$

iar pentru sistemul considerat cu două grade de libertate cinematică

- frecvența naturală de oscilație se calculează cu

$$\omega_{n1,2} = \left[\frac{m_r k_t + m_f (k_t + k_s) \pm \sqrt{(m_r k_t + m_f k_t + m_f k_s)^2 - 4m_r m_f k_t k_s}}{2m_r m_f} \right]^{1/2}$$

- amplitudinea deplasării pe verticală a cilindrului vibrator se calculează

cu

$$Z_d = \sqrt{U_d^2 + V_d^2}$$

- energia absorbită de materialul compactat pe parcursul unui ciclu de oscilație se calculează cu

$$W = c\omega\pi Z_d^2$$

În ultimele relații constantele U_d și V_d se calculează ca funcții de m_r , ω , F_o , k , k_t , c și c_t (sistemul 5.10).

Rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelele 5.1 și 5.2.

Variația cu conținutul de apă a modului de rezistență la tăiere dinamică G_o , a coeficientului de elasticitate k și a coeficientului de vâscozitate c pentru materialul compactat, corespunzător celor două niveluri dispuse pentru densitatea în stare uscată, este prezentată în figurile 5.1, 5.2 și 5.3.

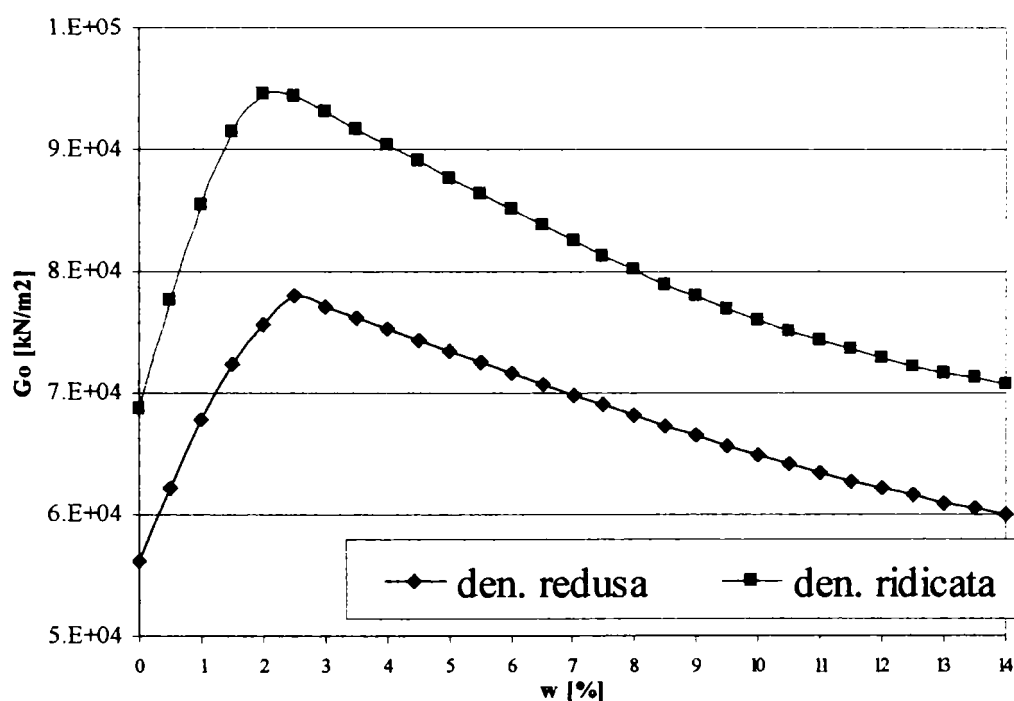


Figura 5.1 Variația modului de rezistență la tăiere cu conținutul de apă

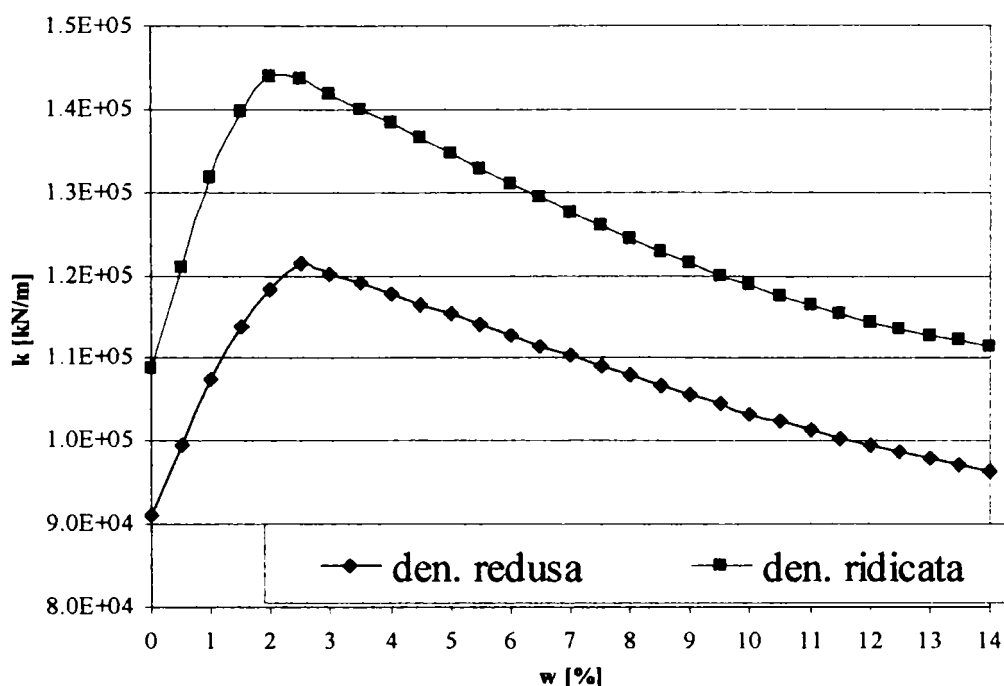


Figura 5.2 Variația coeficientului de elasticitate cu conținutul de apă

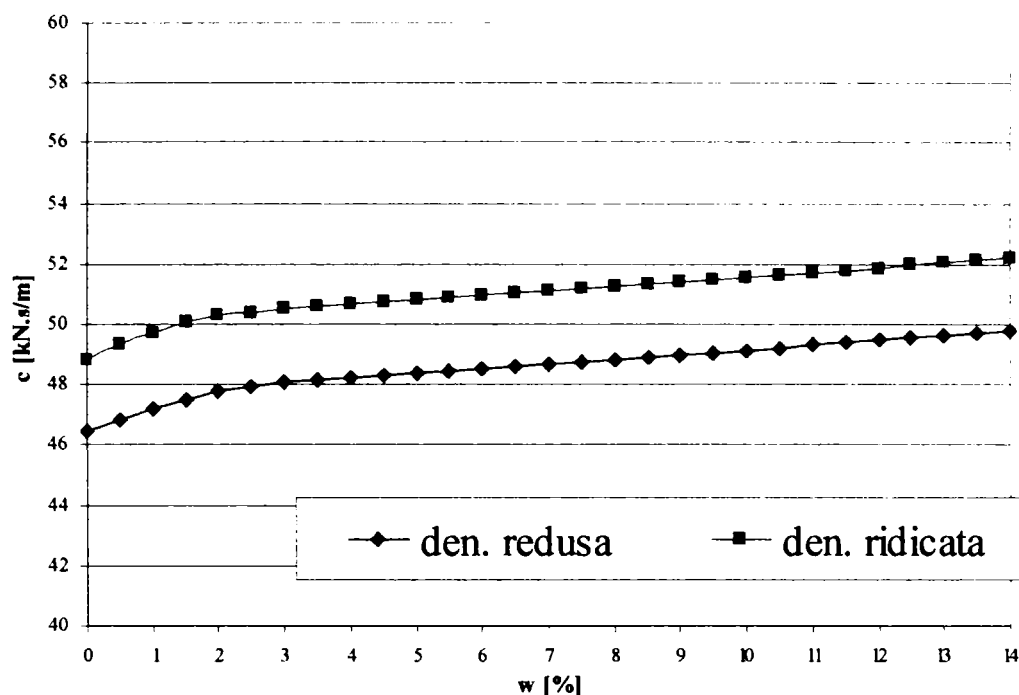


Figura 5.3 Variația coeficientului de vâscozitate cu conținutul de apă

Se observă că toți cei trei parametri, G_o , k și c , prezintă precum era de așteptat, valori mai mari pentru situația nisipului cu densitate în stare uscată mai ridicată.

Coeficientul de rigiditate k urmează variația modulului de rezistență la tăiere dinamică, prezentând valori maxime pentru același procent relativ scăzut al conținutului de apă w (în zona $2 \div 2.5$ %). Acest nivel al conținutului de apă corespunde gradului de saturare optim considerat în modelul *Wu et.al.* Datorită proporționalității directe dintre k și G_o , raportul dintre valorile lor pentru cele două situații ale densității în stare uscată este aproximativ același, circa 1.2 în cazul aplicației de față.

După cum a fost și estimat în paragraful anterior, coeficientul de vâscozitate c nu urmărește variația lui G_o , ci pentru valori mai mari de $2 \div 2.5$ % ale conținutului de apă continuă să crească (cu o pantă mai mică) în raport cu w .

Din figura 5.4, ce prezintă variația frecvenței naturale de oscilație cu conținutul de apă pentru cele patru cazuri distincte (sistemul considerat cu unul, respectiv cu două grade de libertate cinematică, pentru cele două situații ale densității în stare uscată), se poate observa că frecvența naturală corespunzătoare cilindrului vibrator este mai mare pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică. Deasemenea, pentru fiecare tip de sistem, valorile corespunzătoare densității în stare uscată mai ridicată sunt mai mari decât cele corespunzătoare densității reduse.

Tabel 5.1 Den. redusa model Wu et.al.

w [%]	Sr [%]	model Wu et.al.				sistem 1-g-l-c				sistem 2-g-l-c			
		H [-]	Go"wu" [kN/m ²]	b [m]	k [kN/m]	c [kN.s/m]	fr.nat. [rad/s]	Z [m]	W [N.m]	fr.nat.1 [rad/s]	fr.nat.2 [rad/s]	Zd [m]	W [N.m]
0	0.0	0.000	5.62 ;+04	0.025	9.11E+04	46.45	138.3	3.12E-03	67.07	187.6	45.3	2.86E-03	187.11
0.5	1.8	0.108	6.23 ;+04	0.024	9.96E+04	46.86	144.7	4.43E-03	87.83	195.8	45.4	2.23E-03	115.43
1	3.6	0.207	6.78 ;+04	0.023	1.07E+05	47.22	150.2	6.85E-03	126.82	203.0	45.5	1.86E-03	80.80
1.5	5.4	0.289	7.24 ;+04	0.022	1.14E+05	47.53	154.6	1.03E-02	180.93	208.7	45.5	1.64E-03	62.86
2	7.2	0.347	7.57 ;+04	0.022	1.18E+05	47.77	157.7	1.13E-02	192.39	212.6	45.6	1.51E-03	53.62
2.5	9.0	0.387	7.79 ;+04	0.021	1.21E+05	47.97	159.7	1.00E-02	167.23	215.2	45.6	1.43E-03	48.48
3	10.8	0.372	7.71E+04	0.022	1.20E+05	48.06	158.9	1.06E-02	178.84	214.2	45.6	1.46E-03	50.49
3.5	12.6	0.356	7.62E+04	0.022	1.19E+05	48.14	158.1	1.11E-02	188.41	213.2	45.6	1.49E-03	52.69
4	14.3	0.340	7.53E+04	0.022	1.18E+05	48.22	157.3	1.13E-02	194.26	212.2	45.6	1.52E-03	55.07
4.5	16.1	0.324	7.44E+04	0.022	1.17E+05	48.30	156.5	1.12E-02	195.25	211.1	45.5	1.56E-03	57.65
5	17.9	0.308	7.35E+04	0.022	1.15E+05	48.38	155.6	1.08E-02	191.31	210.0	45.5	1.59E-03	60.43
5.5	19.7	0.292	7.26E+04	0.022	1.14E+05	48.46	154.8	1.02E-02	183.50	208.9	45.5	1.63E-03	63.43
6	21.5	0.276	7.17E+04	0.022	1.13E+05	48.54	153.9	9.56E-03	173.42	207.8	45.5	1.67E-03	66.65
6.5	23.3	0.260	7.08E+04	0.022	1.12E+05	48.62	153.1	8.85E-03	162.52	206.7	45.5	1.71E-03	70.09
7	25.1	0.244	6.99E+04	0.023	1.10E+05	48.69	152.2	8.16E-03	151.80	205.6	45.5	1.75E-03	73.76
7.5	26.9	0.228	6.90E+04	0.023	1.09E+05	48.77	151.4	7.53E-03	141.83	204.5	45.5	1.80E-03	77.66
8	28.7	0.213	6.82E+04	0.023	1.08E+05	48.84	150.5	6.96E-03	132.84	203.4	45.5	1.84E-03	81.79
8.5	30.5	0.198	6.73E+04	0.023	1.07E+05	48.92	149.7	6.46E-03	124.88	202.3	45.5	1.89E-03	86.16
9	32.3	0.183	6.65E+04	0.023	1.06E+05	48.99	148.9	6.03E-03	117.92	201.3	45.5	1.94E-03	90.74
9.5	34.1	0.169	6.57E+04	0.023	1.04E+05	49.07	148.1	5.65E-03	111.84	200.3	45.4	1.99E-03	95.54
10	35.9	0.155	6.49E+04	0.023	1.03E+05	49.15	147.4	5.32E-03	106.56	199.3	45.4	2.04E-03	100.54
10.5	37.7	0.142	6.42E+04	0.023	1.02E+05	49.23	146.6	5.03E-03	101.98	198.3	45.4	2.09E-03	105.72
11	39.5	0.129	6.35E+04	0.024	1.01E+05	49.30	145.9	4.78E-03	97.99	197.4	45.4	2.14E-03	111.06
11.5	41.2	0.117	6.28E+04	0.024	1.00E+05	49.38	145.2	4.56E-03	94.52	196.5	45.4	2.19E-03	116.53
12	43.0	0.106	6.22E+04	0.024	9.95E+04	49.46	144.6	4.37E-03	91.50	195.7	45.4	2.24E-03	122.09
12.5	44.8	0.095	6.16E+04	0.024	9.87E+04	49.54	144.0	4.20E-03	88.88	194.9	45.4	2.29E-03	127.73
13	46.6	0.085	6.10E+04	0.024	9.79E+04	49.63	143.4	4.05E-03	86.59	194.2	45.4	2.33E-03	133.38
13.5	48.4	0.076	6.05 ;+04	0.024	9.71E+04	49.71	142.8	3.92E-03	84.60	193.5	45.4	2.38E-03	139.02
14	50.2	0.067	6.00E+04	0.024	9.64E+04	49.79	142.3	3.81E-03	82.86	192.8	45.4	2.43E-03	144.60

Tabel 5.2 Den_ridicata			model Wu et.al.				sistem 1-g-l-c				sistem 2-g-l-c			
w	Sr	H	Go"wu"	b	k	c	fr.nat.	Z	W	fr.nat.1	fr.nat.2	Zd	W	
[%]	[%]	[-]	[kN/m ²]	[m]	[kN/m]	[kN.s/m]	[rad/s]	[m]	[N.m]	[rad/s]	[rad/s]	[m]	[N.m]	
0	0.0	0.000	6.88E+04	0.023	1.09E+05	48.84	151.2	7.38E-03	139.60	204.2	45.5	1.81E-03	78.75	
0.5	2.2	0.129	7.77E+04	0.022	1.21E+05	49.33	159.5	9.99E-03	171.57	214.9	45.6	1.44E-03	50.36	
1	4.3	0.243	8.55E+04	0.021	1.32E+05	49.74	166.4	5.25E-03	83.47	223.9	45.7	1.22E-03	36.57	
1.5	6.5	0.328	9.14E+04	0.020	1.40E+05	50.06	171.3	3.63E-03	54.89	230.2	45.7	1.10E-03	29.77	
2	8.7	0.374	9.45E+04	0.020	1.44E+05	50.29	173.8	3.10E-03	45.71	233.6	45.7	1.04E-03	26.93	
2.5	10.8	0.371	9.43E+04	0.020	1.44E+05	50.40	173.7	3.13E-03	46.26	233.4	45.7	1.04E-03	27.14	
3	13.0	0.352	9.30E+04	0.020	1.42E+05	50.48	172.6	3.33E-03	49.91	232.0	45.7	1.07E-03	28.37	
3.5	15.2	0.333	9.17E+04	0.020	1.40E+05	50.56	171.5	3.56E-03	54.16	230.6	45.7	1.09E-03	29.71	
4	17.3	0.314	9.04E+04	0.020	1.38E+05	50.64	170.4	3.83E-03	59.11	229.2	45.7	1.12E-03	31.16	
4.5	19.5	0.294	8.90E+04	0.020	1.36E+05	50.72	169.3	4.14E-03	64.88	227.7	45.7	1.14E-03	32.73	
5	21.7	0.275	8.77E+04	0.020	1.35E+05	50.79	168.2	4.50E-03	71.61	226.3	45.7	1.17E-03	34.42	
5.5	23.8	0.255	8.64E+04	0.021	1.33E+05	50.86	167.1	4.92E-03	79.46	224.8	45.7	1.20E-03	36.23	
6	26.0	0.236	8.50E+04	0.021	1.31E+05	50.94	165.9	5.41E-03	88.61	223.3	45.6	1.23E-03	38.15	
6.5	28.1	0.217	8.37E+04	0.021	1.29E+05	51.01	164.8	5.97E-03	99.21	221.9	45.6	1.26E-03	40.19	
7	30.3	0.199	8.25E+04	0.021	1.28E+05	51.08	163.7	6.60E-03	111.35	220.5	45.6	1.30E-03	42.34	
7.5	32.5	0.181	8.13E+04	0.021	1.26E+05	51.16	162.7	7.30E-03	125.00	219.1	45.6	1.33E-03	44.59	
8	34.6	0.164	8.01E+04	0.021	1.24E+05	51.23	161.6	8.05E-03	139.84	217.7	45.6	1.36E-03	46.93	
8.5	36.8	0.148	7.90E+04	0.021	1.23E+05	51.30	160.6	8.81E-03	155.16	216.5	45.6	1.40E-03	49.35	
9	39.0	0.133	7.79E+04	0.021	1.21E+05	51.38	159.7	9.52E-03	169.75	215.2	45.6	1.43E-03	51.82	
9.5	41.1	0.118	7.69E+04	0.022	1.20E+05	51.46	158.8	1.01E-02	182.06	214.0	45.6	1.46E-03	54.33	
10	43.3	0.105	7.60E+04	0.022	1.19E+05	51.54	157.9	1.04E-02	190.69	212.9	45.6	1.50E-03	56.87	
10.5	45.5	0.092	7.51E+04	0.022	1.18E+05	51.62	157.1	1.05E-02	194.97	211.9	45.6	1.53E-03	59.40	
11	47.6	0.080	7.43E+04	0.022	1.16E+05	51.70	156.4	1.04E-02	195.22	210.9	45.5	1.56E-03	61.90	
11.5	49.8	0.069	7.36E+04	0.022	1.15E+05	51.78	155.7	1.02E-02	192.42	210.0	45.5	1.59E-03	64.35	
12	52.0	0.059	7.29E+04	0.022	1.14E+05	51.87	155.1	9.83E-03	187.79	209.2	45.5	1.61E-03	66.72	
12.5	54.1	0.050	7.23E+04	0.022	1.14E+05	51.96	154.5	9.46E-03	182.34	208.5	45.5	1.64E-03	68.99	
13	56.3	0.042	7.17E+04	0.022	1.13E+05	52.05	154.0	9.09E-03	176.78	207.8	45.5	1.66E-03	71.14	
13.5	58.5	0.035	7.12E+04	0.022	1.12E+05	52.15	153.5	8.75E-03	171.52	207.2	45.5	1.69E-03	73.15	
14	60.6	0.029	7.08E+04	0.022	1.12E+05	52.24	153.1	8.45E-03	166.78	206.7	45.5	1.71E-03	75.00	

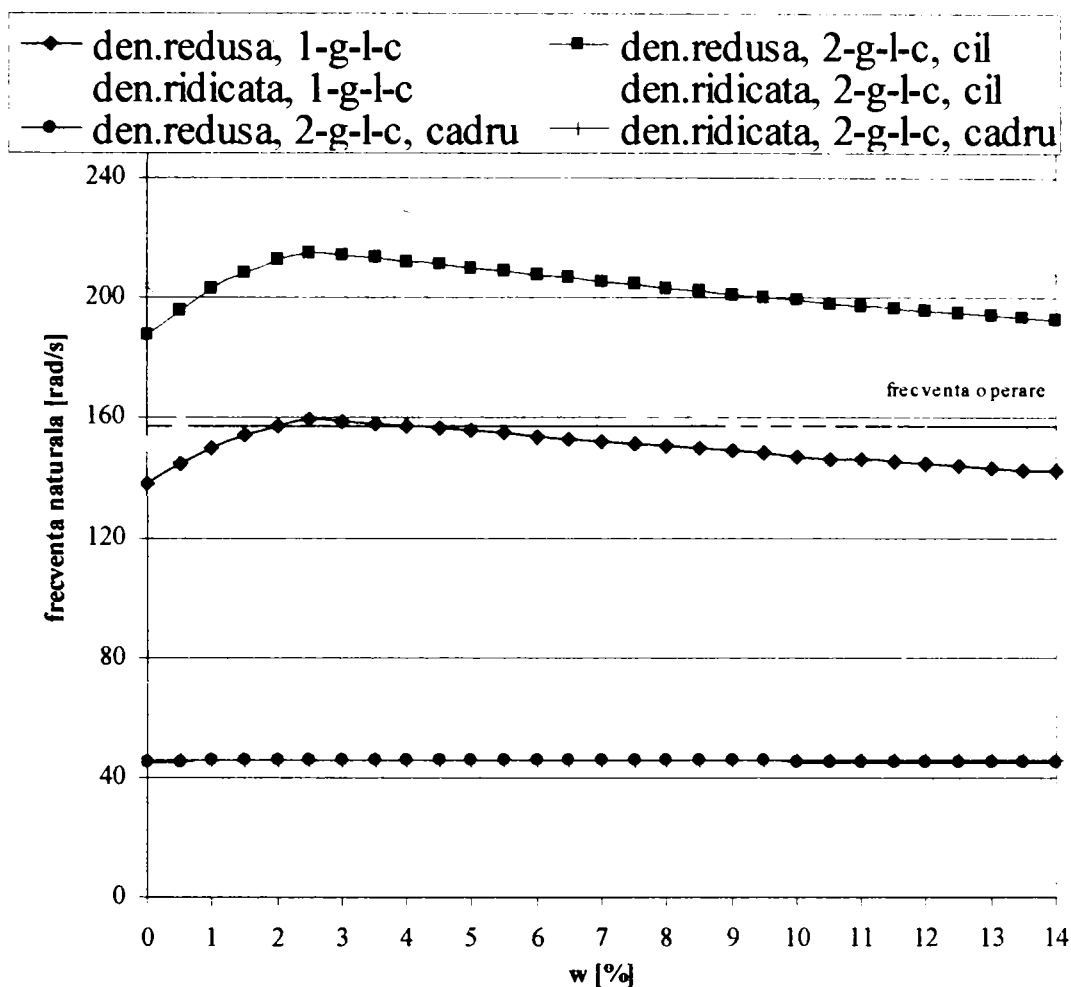


Figura 5.4 Variația frecvențelor naturale de oscilație cu conținutul de apă

În paragraful anterior a fost menționat faptul că la studiul comportării frecvenței naturale de oscilație este important raportul acesteia față de frecvența de operare a dispozitivului vibrator (157 rad/s pentru aplicația de față). Se poate observa că în graficul 5.4 obținut, curbele de variație a frecvenței naturale corespunzătoare sistemului considerat cu un grad de libertate cinematică trec fiecare prin nivelul frecvenței de operare în dreptul a două valori pentru conținutul de apă: circa 0.5 și 10 % pentru situația densității ridicate, respectiv circa 2 și 4 % pentru situația densității reduse.

Ca efect imediat al rezultatelor prezentate până aici, variațiile deplasării pe verticală a cilindrului vibrator, respectiv a energiei absorbite de materialul compactat pe parcursul unui ciclu de oscilare, s-au obținut conform graficelor indicate în figurile 5.5 și 5.6.

În cazul sistemului considerat cu un grad de libertate cinematică, atât Z cât și W prezintă două vârfuri ce corespund punctelor de intersecție a curbei ω_n cu valoarea $\omega_{operare}$. Magnitudinea acestor vârfuri, corespunzător nivelului densității în stare uscată, depinde de poziția lor relativ la valoarea gradului de saturare optim. Valorile maxime ale energiei absorbite pentru situația densității reduse sunt de circa 192 și 195 N.m, iar pentru situația densității ridicate de circa 171 și 195 N.m.

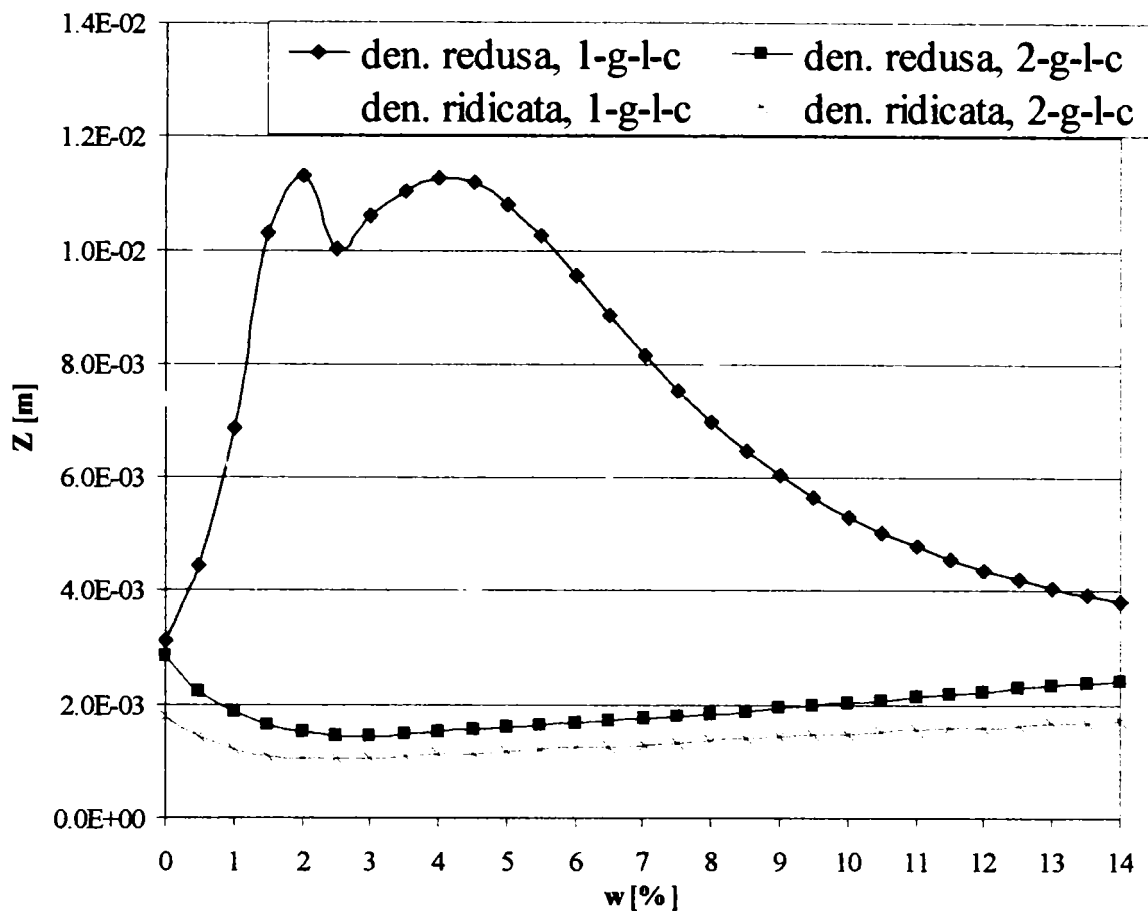


Figura 5.5 Variația amplitudinii cilindrului neted cu conținutul de apă

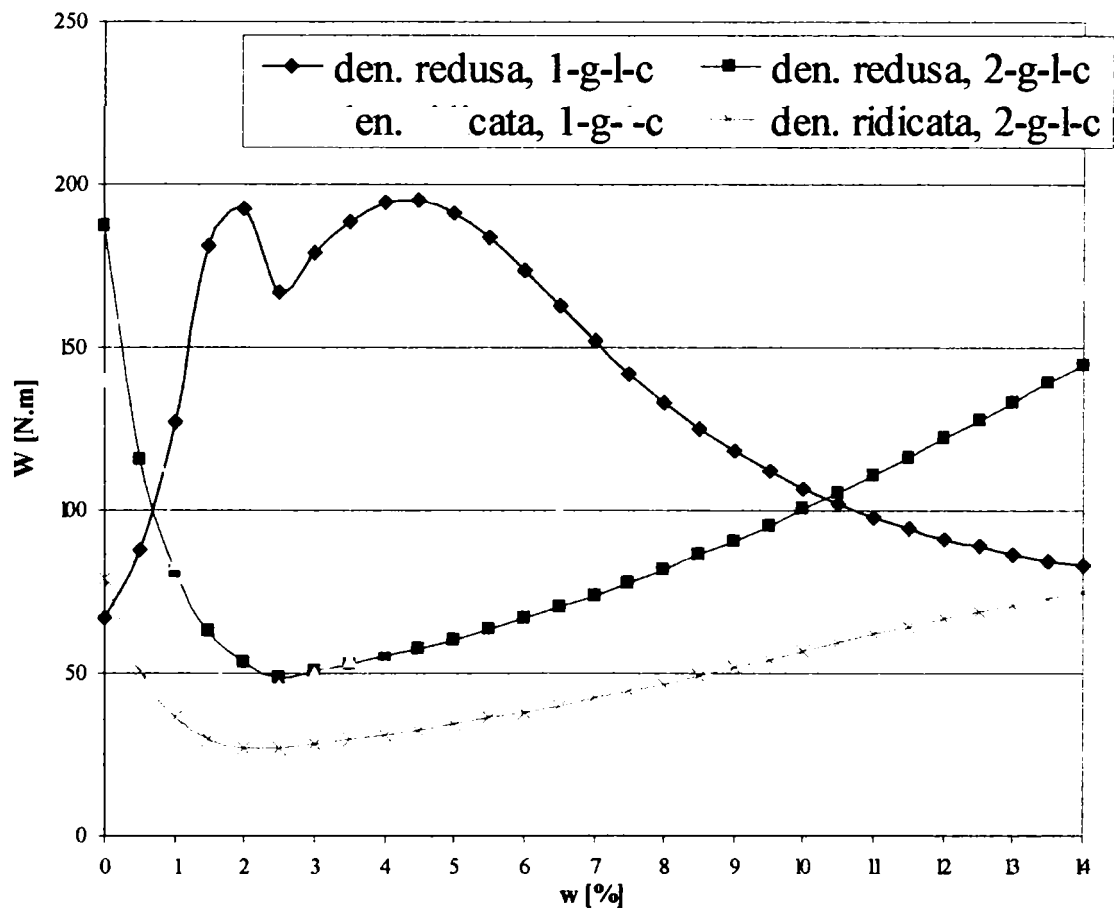


Figura 5.6 Variația energiei absorbite cu conținutul de apă

În zona cuprinsă între cele două vârfuri, în jurul valorii gradului de saturare optim, energia absorbită prezintă un minim (circa 167 N.m pentru prima situație, respectiv 45 N.m pentru cea de a doua situație).

Se menționează că în ceea ce privește energia absorbită de materialul compactat, raportul dintre valoarea maxim atinsă și valoarea corespunzătoare stării complet uscate este de circa 2.9 pentru situația densității reduse, respectiv de circa 1.4 pentru situația densității ridicate.

În ceea ce privește sistemul considerat cu două grade de libertate cinematică, frecvența naturală de oscilație caracteristică cilindrului este în permanență deasupra frecvenței de operare a dispozitivului vibrator. În consecință, atât Z cât și W prezintă valorile cele mai mari fie pentru starea complet uscată, fie pentru cel mai mare procent al conținutului de apă (aproape de starea de saturare a materialului). În zona conținutului de apă ce corespunde gradului de saturare optim amplitudinea deplasării verticale a cilindrului neted, respectiv energia absorbită de materialul compactat, prezintă valori minime. Cea mai mare reducere prezentată de energia absorbită față de valoarea acestei mărimi corespunzătoare stării complet uscate, este de circa 3.8 ori pentru situația densității reduse, respectiv de circa 2.9 ori pentru situația densității ridicate.

Având în vedere rezultatele obținute, se poate spune că pentru un anumit tip de nisip considerat, respectiv pentru anumite condiții de densitate în stare uscată și de conținut de apă, o valoare maximă a energiei absorbite de materialul compactat pe parcursul unui ciclu de oscilare poate fi atinsă prin ajustarea frecvenței de operare a dispozitivului vibrator la nivelul maxim al frecvenței naturale de oscilare a cilindrului neted.

Întrucât în multe situații practice utilajele de compactare obișnuite nu sunt dotate cu dispozitiv vibrator reglabil, cazul optim în care energia absorbită prezintă valoare maximă poate fi realizat prin modificarea conținutului de apă al materialului compactat către un nivel corespunzător.

Capitolul 6

ANALIZA NUMERICĂ A SISTEMULUI CILINDRU – MATERIAL COMPACTAT

În acest capitol se prezintă modul prin care, cu ajutorul elementelor finite, s-a determinat răspunsul sistemului cilindru vibrator – material compactat pe parcursul unei perioade de oscilație a dispozitivului vibrator. Modelarea cu elemente finite a fost aplicată asupra aceluiași sistem, utilaj de compactare cu cilindru vibrator ce lucrează pe o umplutură de nisip fin, considerat în studiul analitic prezentat în Capitolul 5. Analiza concepută în plan, a fost realizată prin intermediul programului de calcul ANSYS, elaborat de SAS IP Inc. Company.

În primul paragraf, în vederea înțelegerii modului de lucru al programului utilizat, este prezentată pe scurt acea parte din baza teoretică a acestuia care se referă la modelarea unui sistem de tipul celui studiat în lucrare. Astfel, după trecerea în revistă a stării de tensiuni și deformații în elementul finit tridimensional oarecare, sunt indicate caracteristicile elementelor finite plane utilizate în modelarea corpurilor ce formează sistemul considerat (materialul de umplutură, cilindrul cadrul de susținere), respectiv a elementelor finite prin intermediul cărora se realizează legăturile dintre corpuri (lagărul de cuplare a cilindrului de cadru, zona de contact a cilindrului cu terenul). În continuare este prezentat procedeul tranzient prin care este analizată comportarea sistemului particular modelat.

În cel de-al doi-lea paragraf este prezentat modul concret în care s-au modelat prin elemente finite părțile componente ale sistemului studiat, respectiv modul de modelare al încărcării dinamice produse de dispozitivul vibrator. Deasemenea sunt indicate dimensiunile și valorile parametrilor principali ce caracterizează sistemul.

Rezultatele urmărite prin modelarea cu elemente finite sunt prezentate în paragraful al trei-lea. Analiza numerică a fost realizată atât pentru sistemul considerat cu un grad cât și cu două grade de libertate cinematică, în fiecare din aceste variante dispunându-se două niveluri pentru densitatea în stare uscată. Efectul variației de apă din materialul compactat a fost luat în considerare prin analiza modelului cu programul ANSYS de mai multe ori, modificând de fiecare dată valorile caracteristicilor influențate de acest parametru (modul de rezistență, coeficient de vâscozitate). Comportarea sistemului în aceste condiții date a fost stabilită pe parcursul unei singure perioade de oscilație, încărcarea dinamică aferentă fiind modelată în trepte succesive.

Ca rezultat principal al analizei a fost reținută deplasarea pe verticală a nivelului terenului în zona de contact a acestuia cu cilindrul. În acest fel, în afară de posibilitatea de estimare ulterioară a energiei absorbite de teren pe parcursul procesului de compactare, a fost stabilit un termen de comparație cu rezultatele obținute prin studiul analitic prezentat în Capitolul 5.

Pe baza rezultatelor obținute în prezentul capitol, se poate spune că programul ANSYS oferă posibilitatea analizării comportării sistemului alcătuit dintr-un utilaj de compactare cu cilindru vibrator ce acționează asupra unui material granular fin în umplutură. Totuși, pentru ca prin modelarea cu elemente finite să fie obținute rezultate cât mai apropiate de comportarea reală a sistemului studiat, sunt necesare câteva îmbunătățiri în modul de abordare a problemei. În acest sens, se menționează discretizarea mai fină a materialului compactat, modelarea încărcării dinamice direct prin funcția sinusoidală, stabilirea răspunsului sistemului pe parcursul mai multor perioade de oscilație consecutive. Deasemenea, pentru o ilustrare și mai exactă a fenomenului, este necesară modelarea comportării elasto-plastice a materialului compactat.

6.1 Noțiuni teoretice generale

În paragraful de față este prezentată pe scurt o parte din baza teoretică a programului ANSYS (SAS IP, 2001), de analiză prin elemente finite a sistemelor ce modelează diverse structuri. Se face referire numai la cazul modelării unui sistem de tipul celui studiat în lucrare. Informațiile prezentate, nu reprezintă în mod explicit teoria generală a metodei elementelor finite, ci au ca scop înțelegerea procedurii de lucru al programului menționat în vederea unei utilizări corespunzătoare, respectiv a unei interpretări corecte a rezultatelor obținute.

6.1.1 Starea de tensiuni și deformații într-un element finit oarecare

Pentru cazul structurilor alcătuite din materiale ce se consideră ca având o comportare liniară, relația fundamentală dintre tensiuni și deformații specifice pentru un element tri-dimensional este pusă sub formă matriceală astfel:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \tag{6.1}$$

în care:

$\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}\}^T$ reprezintă vectorul tensiunilor;

$[D]$ reprezintă matricea de flexibilitate;

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{zx}\}^T$ reprezintă vectorul deformațiilor specifice.

Elementele ce alcătuiesc vectorul tensiunilor sunt prezentate în figura 6.1. Conform convenției de semne considerată în programul ANSYS, tensiunile normale sunt pozitive când corespund unei întinderi, iar tensiunile tangențiale sunt pozitive atunci când acțiunea lor corespunde unei rotiri a axei perpendiculare pe fațetă către sensul pozitiv al axei paralele.

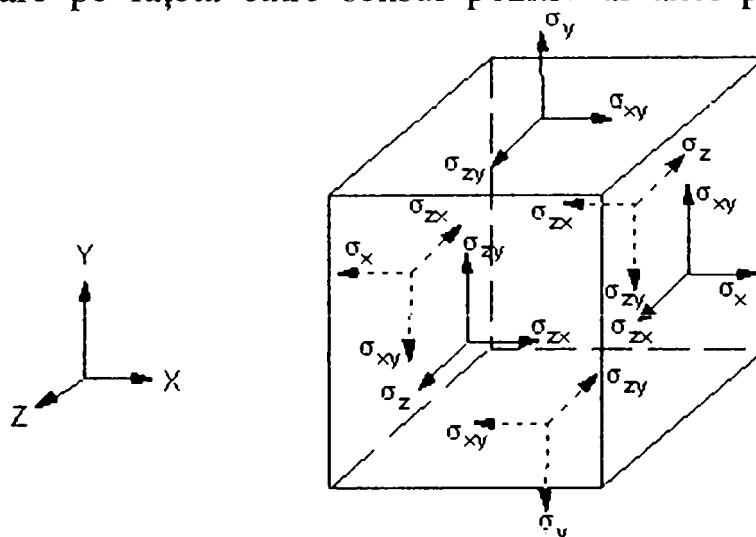


Figura 6.1 Definirea vectorului tensiunilor

Relația 6.1 se poate inversa:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \cdot \{\sigma\} \tag{6.2}$$

unde inversa matricei de flexibilitate are forma desfășurată (6.3).

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Parametrii care intervin în expresia (6.3) sunt: E_x , E_y și E_z – modulul de elasticitate corespunzător celor trei direcții; G_{xy} , G_{yz} , G_{zx} – modulul de elasticitate la tăiere corespunzător fațetelor elementului prezentat în figura 6.1; ν_{xy} , ν_{yx} , ν_{xz} – coeficientul lui Poisson, deasemenea corespunzător fațetelor elementului considerat.

Matricea $[D]^{-1}$ se consideră simetrică, astfel că:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (6.4)$$

Având în vedere aceste trei relații, în cazul general al materialelor ortotrope coeficienții ν nu sunt independenți. Cu toate acestea, pentru situația materialelor izotrope, considerată în modelarea desfășurată, atât coeficienții ν , cât și modulul E , prezintă câte o singură valoare.

În relația (6.2) se introduc expresiile vectorilor tensiune și deformație specifică, respectiv inverse matricei de flexibilitate, iar prin explicitare se obțin cele șase expresii ale deformațiilor specifice:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (6.5)$$

$$\text{și} \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G}, \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{G} \quad (6.6)$$

Prin inversarea matricei (6.3) și considerând relația (6.1), se obțin expresiile prin care sunt calculate în program tensiunile normale și tangențiale:

$$\sigma_x = \frac{E}{h} \cdot [\nu^2(-\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) + \varepsilon_x]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{h} \cdot [\nu^2(\varepsilon_x - \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z) + \varepsilon_y] \quad (6.7)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{h} \cdot [\nu^2(\varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_z) + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \varepsilon_z]$$

$$\sigma_{xy} = G \cdot \varepsilon_{xy}, \quad \sigma_{yz} = G \cdot \varepsilon_{yz}, \quad \sigma_{zx} = G \cdot \varepsilon_{zx} \quad (6.8)$$

în care h reprezintă o notație având următoarea expresie:

$$h = 1 - 3\nu^2 - 2\nu^3 \quad (6.9)$$

Modulul de rezistență la tăiere G , în cazul materialelor izotrope, nu se introduce în model în mod direct ci se calculează în funcție de modulul de elasticitate E și coeficientul lui Poisson ν .

În ceea ce privește că matricea D se face observația că aceasta trebuie să fie pozitiv definită, programul verificând valorile ce definesc proprietățile materialului astfel încât matricea să respecte această condiție. Parametrul h , definit prin expresia (6.9), trebuie deasemenea să fie pozitiv.

6.1.2 Caracteristici ale elementelor finite considerate în aplicație

În aplicația desfășurată, pentru modelarea plană a sistemului cilindru vibrator – material compactat au fost utilizate elemente finite de tipul PLANE182 (fig.6.2.a). Acest element este definit prin patru noduri, fiecare prezentând două grade de libertate (translațiile pe direcțiile x și y). Elementul este caracterizat prin plasticitate, rigiditate și deformabilitate, fiind capabil de deformații specifice semnificative.

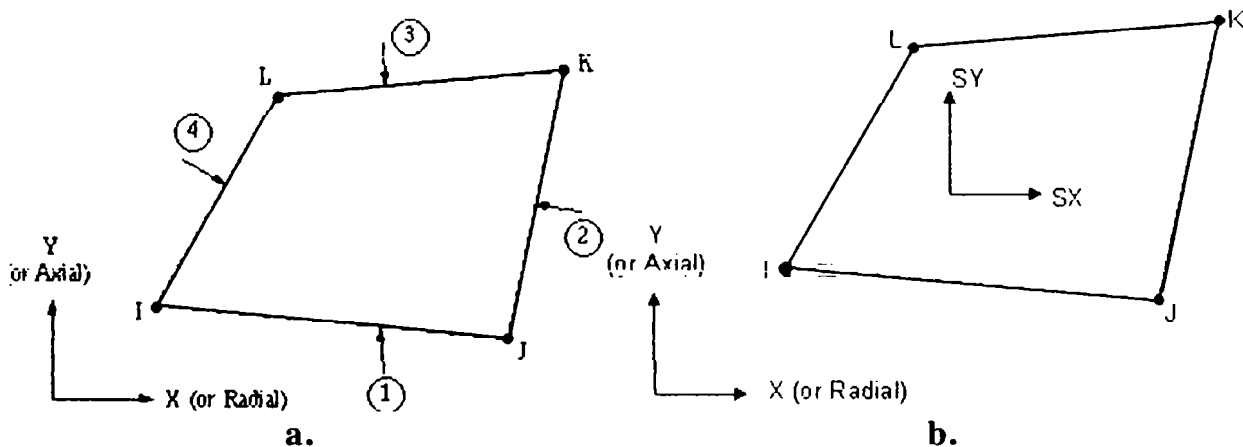


Figura 6.2 a. Structura elementului finit de tipul PLANE182
b. Starea de tensiune atașată elementului finit

Datele necesare în program, referitoare la elemental finit dispus, se referă la cele patru noduri, grosimea în profunzime a elementului (necesară pentru situația considerată a stării plane de deformație), respectiv la proprietățile materialului.

Încărcările asupra elementelor se manifestă dealungul laturilor, așa cum este indicat în figura 6.2 de cifrele încercuite.

Referitor la rezultatele date de program pentru tipul de element finit PLANE182, acestea cuprind în principal deplasările nodurilor și starea de tensiune (fig.6.2.b).

Corespunzător formei elementului considerat, funcțiile de interpolare pentru obținerea deplasărilor acestuia pe cele două direcții (fig.6.3) sunt:

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{1}{4} [u_I(1-s)(1-t) + u_J(1+s)(1-t) + u_K(1+s)(1+t) + u_L(1-s)(1+t)] \\
 v &= \frac{1}{4} [v_I(1-s)(1-t) + v_J(1+s)(1-t) + v_K(1+s)(1+t) + v_L(1-s)(1+t)]
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

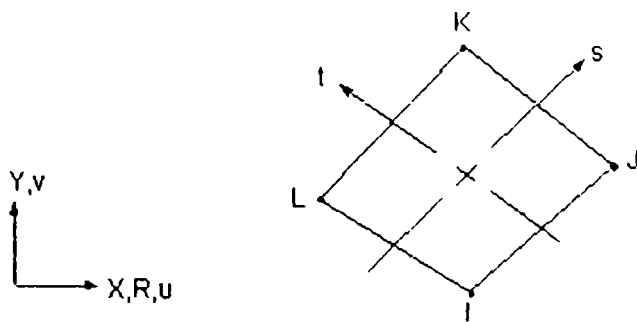


Figura 6.3 Direcțiile deplasărilor elementului finit PLANE182

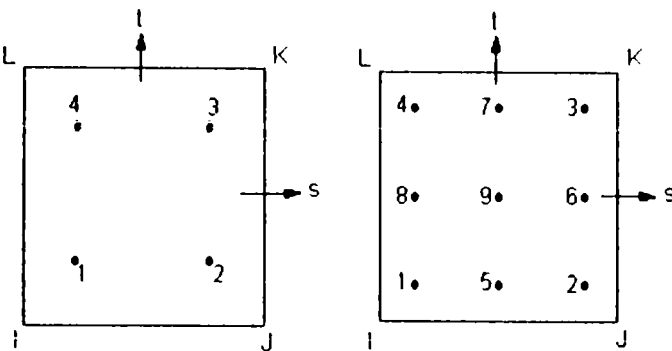


Figura 6.4 Poziția punctelor de integrare numerică pe elemental PLANE182

Pentru integrarea numerică a funcțiilor diverselor mărimi pe elementul finit de tipul PLANE182, programul consideră fie 2x2 fie 3x3 puncte de integrare (fig.6.4), iar expresia generală de integrare este:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x_i, y_j) \cdot dx \cdot dy = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^l H_j \cdot H_i \cdot f(x_i, y_j) \quad (6.11)$$

în care $f(x,y)$ este funcția ce se integrează, H_i și H_j sunt factori de masă, x_i și y_j indică poziția punctelor de integrare, iar m și l reprezintă numărul punctelor de integrare.

În ceea ce privește modelarea legăturii vâsco-elastice dintre cilindrul vibrator și cadrul de susținere, programul oferă posibilitatea utilizării unui element de tipul COMBIN14, prezentat schematic în figura 6.5.a.

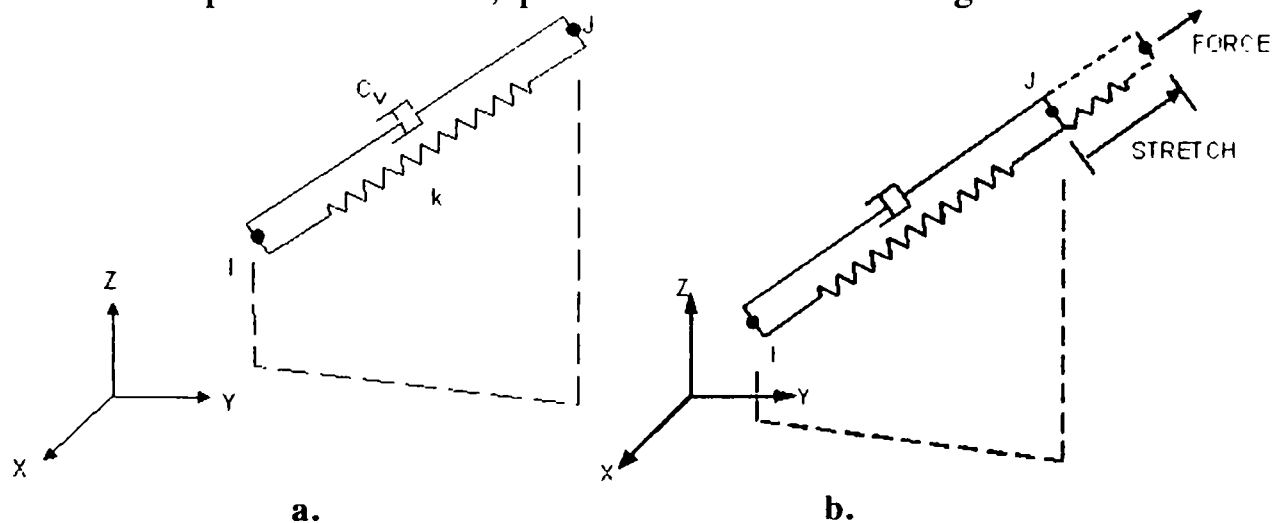
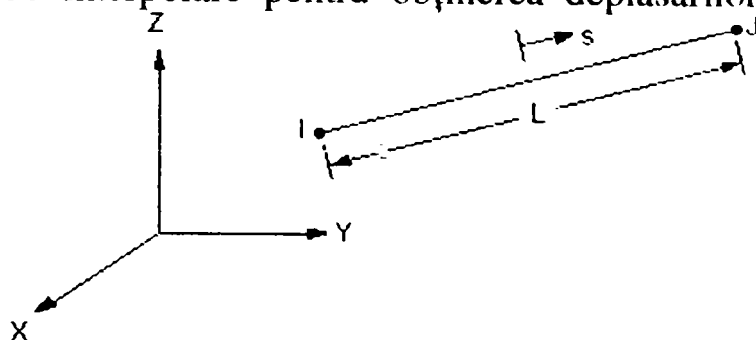


Figura 6.5 Elementul finit resort-piston COMBIN14

Elementul COMBIN14, utilizabil în aplicații uni-, bi- sau tridimensionale, este capabil de întindere – compresiune vâsco-elastică uniaxială. Cele două noduri de capăt ale elementului sunt caracterizate de trei grade de libertate, și anume translațiile pe cele trei direcții x, y și z. Elementul nu preia nici încovoiere și nici torsiune, și nu este caracterizat prin masă. Datele necesare pentru definirea elementului COMBIN14 se referă la poziția nodurilor, respective la constanta resortului și coeficientul de

vâscozitate. Programul determină poziția deplasată a nodurilor, precum și forța din resort și piston, respectiv modificarea de lungime a elementului (fig.6.5.b). Corespunzător formei elementului considerat (fig.6.6), funcțiile de interpolare pentru obținerea deplasărilor sunt:



$$u = \frac{1}{2} [u_I(1-s) + u_J(1+s)] \tag{6.12}$$

$$v = \frac{1}{2} [v_I(1-s) + v_J(1+s)]$$

Figura 6.6 Direcțiile deplasărilor elementului COMBIN14

În ceea ce privește zona de contact dintre cilindru și terenul compactat, programul oferă posibilitatea utilizării unei perechi de elemente de contact speciale (fig.6.7), TARGE169 (pentru modelarea porțiunii inferioare a cilindrului, corpul rigid) și CONTA172 (pentru modelarea suprafeței corespunzătoare a terenului, corpul flexibil).

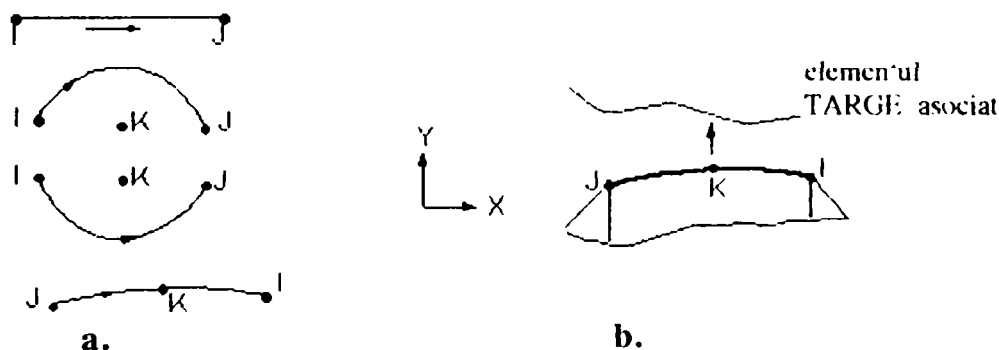


Figura 6.7 Elementele de contact TARGE169 (a.) și CONTA172 (b.)

Forța de reacțiune ce se dezvoltă asupra corpului rigid (cilindru) este calculată ca sumă a tuturor forțelor din nodurile asociate elementului TARGE169.

6.1.3 Procedeele de analizare a comportării sistemului

Odată stabilită legătura dintre eforturi și deplasări pentru fiecare tip de element finit (deci matricea de rigiditate elementală) din alcătuirea modelului, programul stabilește elementul de legătură respectiv pentru întregul model (asamblând matricea de rigiditate structurală prin intermediul metodelor matriceale standard). În continuare, pentru analiza comportării modelului, programul aplică procedeul corespunzător naturii modelului.

Pentru modelarea unui sistem structural de gradul doi, programul consideră un procedeu tranzient de analiză (TRANS) care are la bază următoarea ecuație diferențială pusă sub formă matriceală:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (6.13)$$

în care:

$[M]$ este matricea structurală a masei, $[C]$ este matricea structurală a vâscozității, $[K]$ este matricea structurală a rigidității, $\{\ddot{u}\}$ este vectorul accelerațiilor nodale, $\{\dot{u}\}$ este vectorul vitezelor nodale, $\{u\}$ este vectorul deplasărilor nodale, iar $\{F\}$ este vectorul încărcărilor.

Pentru rezolvarea ecuației matriceale (6.13) programul ANSYS pune la dispoziție două metode de integrare numerică în funcție de pasul de timp. Dintre acestea metoda Newmark, implicită, utilizează următoarele variații finite într-un interval de timp Δt :

$$\begin{aligned} \{\dot{u}_{n+1}\} &= \{\dot{u}_n\} + [(1-\delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}] \cdot \Delta t \\ \{u_{n+1}\} &= \{u_n\} + \{\dot{u}_n\} \cdot \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \{\ddot{u}_n\} + \alpha \{\ddot{u}_{n+1}\} \right] \cdot \Delta t^2 \end{aligned} \quad (6.14)$$

în care:

α și δ sunt parametrii de integrare, $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ este pasul de timp considerat, $\{u_n\}$, $\{\dot{u}_n\}$, $\{\ddot{u}_n\}$, $\{u_{n+1}\}$, $\{\dot{u}_{n+1}\}$ și $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ sunt vectorii deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor nodale la momentele t_n , respectiv t_{n+1} .

Ecuația (6.13) se scrie corespunzător momentului t_{n+1} :

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F\} \quad (6.13')$$

în care se introduc expresiile variabilelor, stabilite pe baza variațiilor finite (6.14):

$$\begin{aligned} \{\ddot{u}_{n+1}\} &= a_0 \cdot (\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2 \cdot \{\dot{u}_n\} - a_3 \cdot \{\ddot{u}_n\} \\ \{\dot{u}_{n+1}\} &= \{\dot{u}_n\} + a_6 \cdot \{\ddot{u}_n\} + a_7 \cdot \{\ddot{u}_{n+1}\} \end{aligned} \quad (6.15)$$

În urma substituiri, ecuația matriceală (6.13') devine o funcție doar de variabila $\{u_{n+1}\}$, în care intervin valorile corespunzătoare momentului t_n :

$$\begin{aligned} (a_0 \cdot [M] + a_1 \cdot [C] + [K]) \cdot \{u_{n+1}\} = \\ = \{F\} + [M](a_0 \cdot \{u_n\} + a_2 \cdot \{\dot{u}_n\} + a_3 \cdot \{\ddot{u}_n\}) + [C](a_1 \cdot \{u_n\} + a_4 \cdot \{\dot{u}_n\} + a_5 \cdot \{\ddot{u}_n\}) \end{aligned} \quad (6.13'')$$

unde a_0 până la a_7 sunt notații de calcul în care intervin α , δ și Δt .

Odată determinată soluția $\{u_{n+1}\}$, se determină și vectorii $\{\dot{u}_{n+1}\}$ și $\{\ddot{u}_{n+1}\}$.

Valorile de start pentru calcul, $\{u_0\}$, $\{\dot{u}_0\}$ și $\{\ddot{u}_0\}$, fie se consideră 0 (implicit, neavând impuse anumite condiții inițiale), fie prezintă valorile determinate de un stadiu de încărcare anterior.

6.2 Modelarea prin elemente finite a sistemului cilindru vibrator – material compactat

În vederea analizei cu ajutorul programului de calcul ANSYS, prin elemente finite, sistemul cilindru vibrator – material compactat a fost modelat bidimensional pentru aceleași condiții cu cele considerate în Capitolul 5 al prezentei lucrări. Astfel, sistemul a fost dispus atât în varianta cu un grad de libertate cinematică (cilindrul vibrator cuplat rigid cu cadrul de susținere) cât și în varianta cu două grade de libertate cinematică (elementul de cuplare dintre cilindru și cadrul de susținere fiind caracterizat prin coeficienții de elasticitate și vâscozitate). În ambele variante au fost considerate câte două niveluri pentru densitatea materialului asupra căruia acționează cilindrul.

Valorile parametrilor ce caracterizează utilajul de compactare considerat (CH-43) sunt: masa totală a modulului frontal al utilajului (pe baza căreia s-a stabilit greutatea specifică a materialului prin care se modelează cilindrul în varianta un grad de libertate cinematică) $m_r = m_d + m_e + m_f = 4760$ kg; masa cilindrului vibrator (inclusiv excentricele), respectiv a cadrului de susținere, $m_d + m_e = 2720$ kg și $m_f = 2040$ kg (pe baza cărora s-au stabilit greutatele specifice ale materialelor prin care se modelează aceste piese); lățimea și diametrul cilindrului $2a = 1.6$ m, $2r = 1.2$ m; coeficienții de elasticitate și de vâscozitate ce caracterizează sistemul de susținere a cilindrului $k_t = 4400$ kN/m și $c_t = 4.4$ kN.s/m.

În ceea ce privește modelarea materialului asupra căruia acționează cilindrul (umplutură de nisip prăfos uniform gradat), cele două valori ale densității în stare uscată sunt $\rho_d = 1524$ kg/m³ și $\rho_d = 1644$ kg/m³. Variația conținutului de apă, în intervalul 0 – 14 %, a fost considerată prin efectul asupra modulului de rezistență la tăiere, respectiv asupra coeficientului de vâscozitate. Valorile dispuse pentru modulul de rezistență la tăiere (pe baza căruia s-a determinat modulul de elasticitate) și a coeficientului de vâscozitate sunt cele prezentate în tabelele 5.1 și 5.2.

Discretizarea sistemului în varianta cu două grade de libertate cinematică în elemente finite de tip PLANE182, este prezentată în figura 6.8. S-a considerat în mod acoperitor că influența acțiunii cilindrului asupra materialului compactat nu mai este semnificativă la circa cinci diametrii față de zona de contact. Astfel, nodurilor de pe limitele inferioară (6 m adâncime) și stânga dreapta (± 6 m față de axa de simetrie) ale domeniului li s-au impus deplasări nule pe ambele direcții. În ceea ce privește mișcarea cilindrului și a cadrului de susținere, s-a impus ca aceasta să aibă loc numai pe verticală. Astfel, s-a blocat deplasarea pe orizontală a nodurilor ce mărginesc diametrul orizontal al discului, respectiv a nodurilor ce mărginesc pe lateral piesa ce modelează cadrul.

Modelarea sistemului în varianta cu un grad de libertate cinematică a fost realizată corectând modelul din figura 6.8 prin eliminarea piesei ce reprezintă cadrul și, respectiv, a elementului de legătură a acesteia cu cilindrul (COMBIN14).

În profunzime (axa z), modelul a fost dispus de dimensiune unitară.

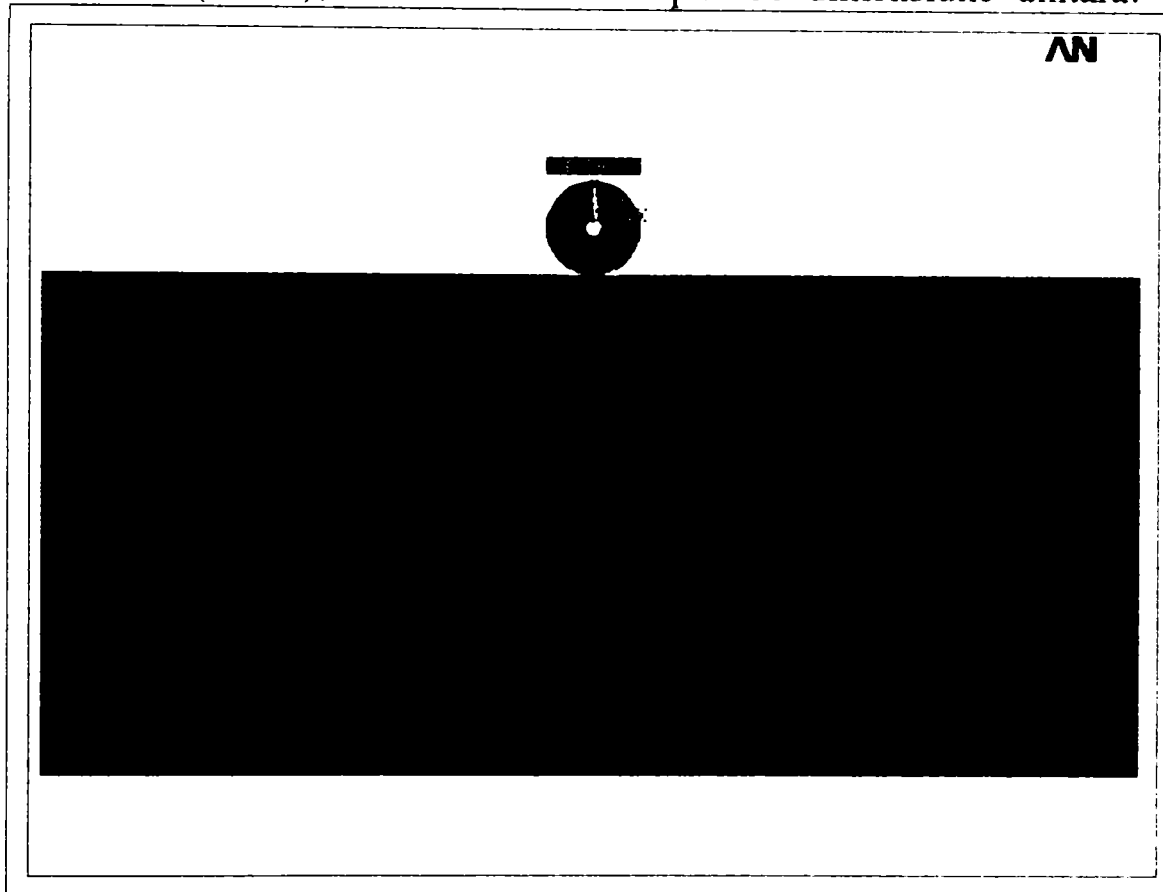


Figura 6.8 Modelarea prin elemente finite a sistemului cilindru vibrator – material compactat

Se observă că discretizarea a fost dispusă mai fină înspre zona de contact dintre cilindru și teren. Ochiurile rețelei ce discretizează terenul sunt, în zona de contact de $0.15 \times 0.15 \text{m}$, iar în colțurile cel mai depărtate de $0.6 \times 0.6 \text{m}$. Zona de contact a fost modelată prin intermediul perechii de elemente TARGE169 și CONTA172 ce se întind pe câte 30 cm stânga dreapta față de axa de simetrie a modelului.

Încărcarea la care este supus cilindru a fost dispusă ca forță concentrată în nodul imediat sub centrul discului ce modelează cilindru (dispozitivul vibrator fiind fixat pe axul cilindrului). Forța dinamică de funcție armonică este $F = F_0 \cdot \sin \omega t$, în care mărimea forței și frecvența circulară dezvoltate de dispozitivul vibrator sunt $\omega = 2\pi f = 157.08 \text{ rad/s}$ și $F_0 = 85 \text{ kN}$. Având în vedere că s-a urmărit comportarea sistemului pe parcursul unei singure perioade de oscilație $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{25 \text{ Hz}} = 0.04 \text{ s}$, încărcarea a fost modelată în trepte corespunzătoare unui pas de timp $t = 0.001 \text{ s}$.

6.3 Prezentarea și interpretarea rezultatelor

Având în vedere că s-a urmărit studierea sistemului cilindru vibrator – material compactat în cele două variante, cu unul respectiv cu două grade de libertate cinematică, fiecare pentru câte două niveluri ale densității în stare uscată, modelul a fost pregătit în patru situații de bază. În continuare, întrucât s-a dorit varierea proprietăților materialului ce modelează terenul, odată cu reconsiderarea conținutului de apă în intervalul $0 \div 14 \%$, pentru fiecare din cele patru situații de bază au fost dispuse câte 29 cazuri particulare de modelare.

În concluzie, modelul în elemente finite al sistemului cilindru vibrator – material compactat a fost analizat prin programul ANSYS de 116 ori. Astfel, s-a obținut același număr de rezultate referitoare la comportarea sistemului ca și în urma studiului analitic prezentat în Capitolul 5, condițiile considerate pentru proprietățile sistemului modelat fiind aceleași.

Rezultatele oferite în urma analizei de către programul ANSYS constau în principal în starea de deformație a rețelei de discretizare și starea de tensiuni din elementele finite. În figurile 6.9 ÷ 6.12 sunt prezentate câte un exemplu de rezultat referitor la spectrul deplasării maxime pe verticală (u_y), respectiv al tensiunii normale verticale corespunzătoare (σ_y), pentru cele două variante de sistem modelat. Imaginile corespund cazului unui conținut nul de apă în material, respectiv nivelului redus al densității în stare uscată. Figurile 6.13 și 6.14 prezintă câte un detaliu din spectrul deplasării considerate, respectiv a tensiunii normale, în zona contactului dintre cilindru și teren, varianta sistemului cu două grade de libertate. Se menționează că unitățile de măsură în care sunt prezentate rezultatele sunt [m] pentru deplasare, respectiv [N/m^2] pentru tensiune.

Pentru a avea un termen de comparație cu rezultatele studiului analitic, din rezultatele obținute prin analiza numerică s-a reținut, pentru fiecare caz particular, valoarea deplasării maxime pe verticală U a nodului de pe teren (nr.124) din mijlocul zonei de contact cu cilindrul. În tabelele 6.1 și 6.2 se dau valorile acestei deplasări, pentru toate cazurile referitoare la proprietățile materialului compactat, respectiv pentru cele două variante ale tipului sistemului (U și Ud). În tabele sunt deasemenea prezentate datele semnificative cu privire la proprietățile materialului, conținutul de apă w , modulul de rezistență la tăiere dinamică G_o (calculat prin intermediul modelului *Wu et.al.*), coeficienții de elasticitate și vâscozitate k și c , precum și valorile deplasării maxime a cilindrului Z (sau Zd) obținute prin studiul analitic (vezi Capitolul 5).

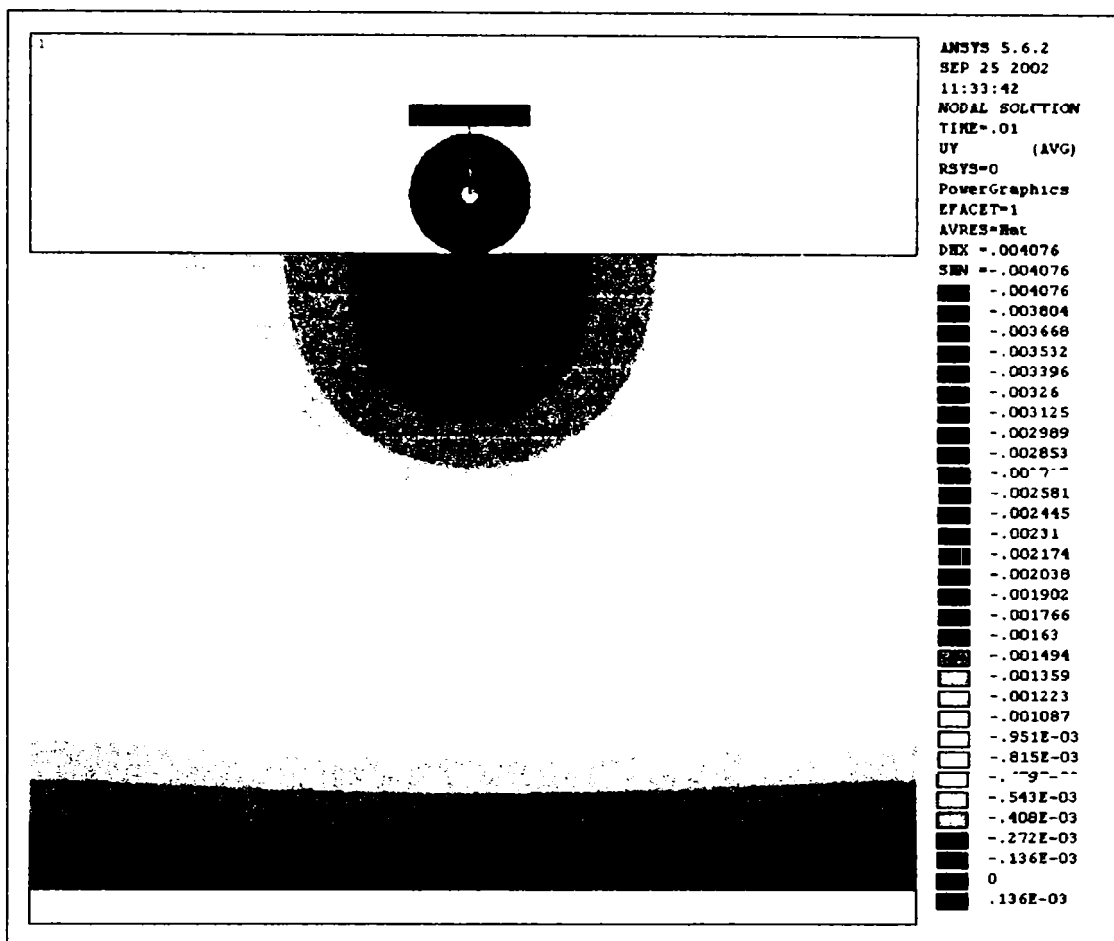


Figura 6.9 Spectrul deplasării maxime pe verticală [m] pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică

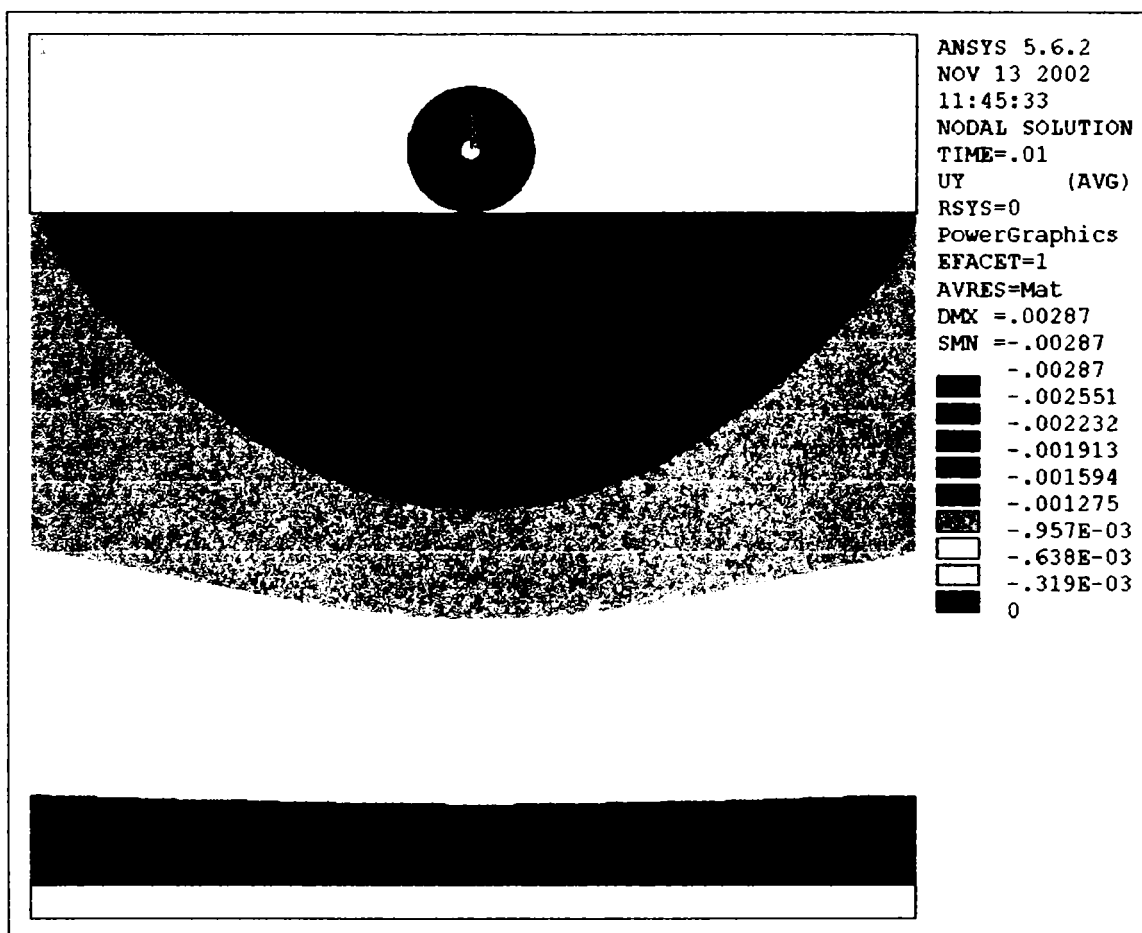


Figura 6.10 Spectrul deplasării maxime pe verticală [m] pentru sistemul cu un grad de libertate cinematică

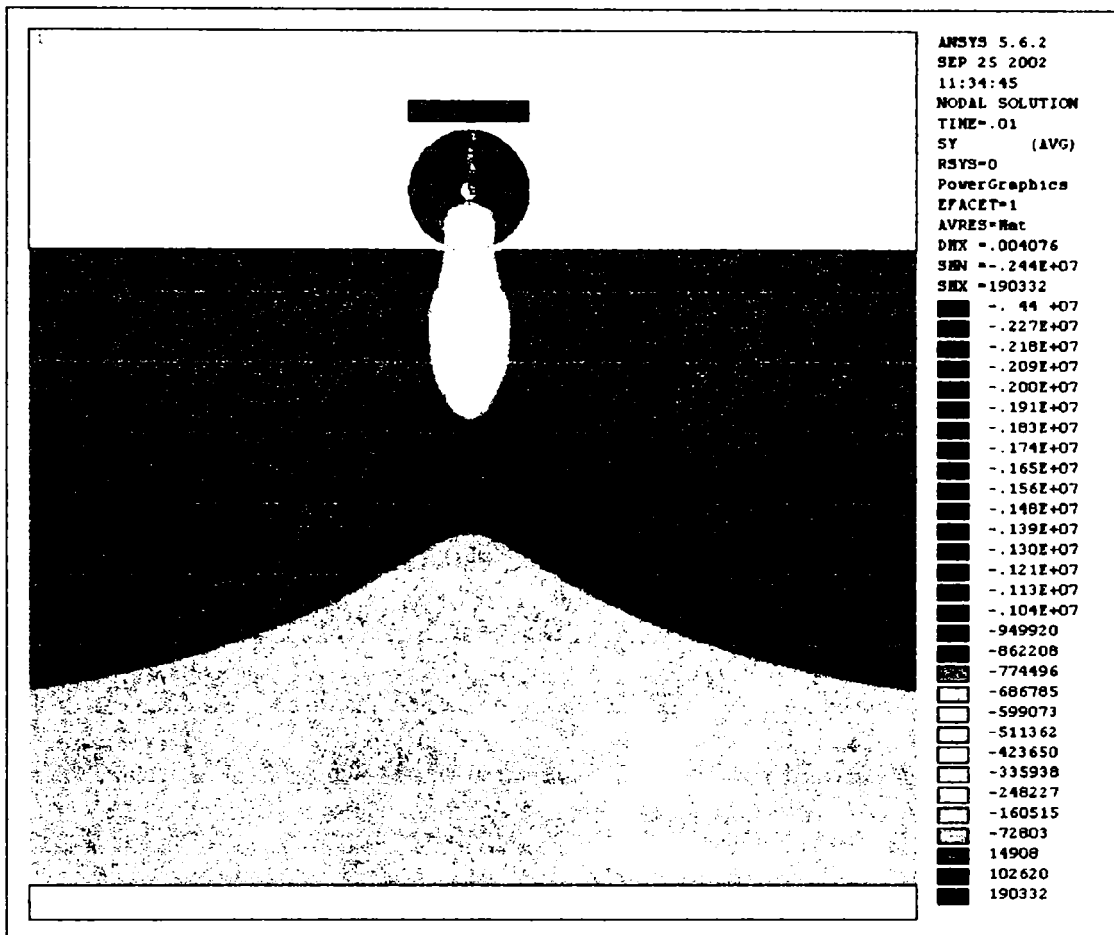


Figura 6.11 Spectrul tensiunii normale pe verticală [N/m²] pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică

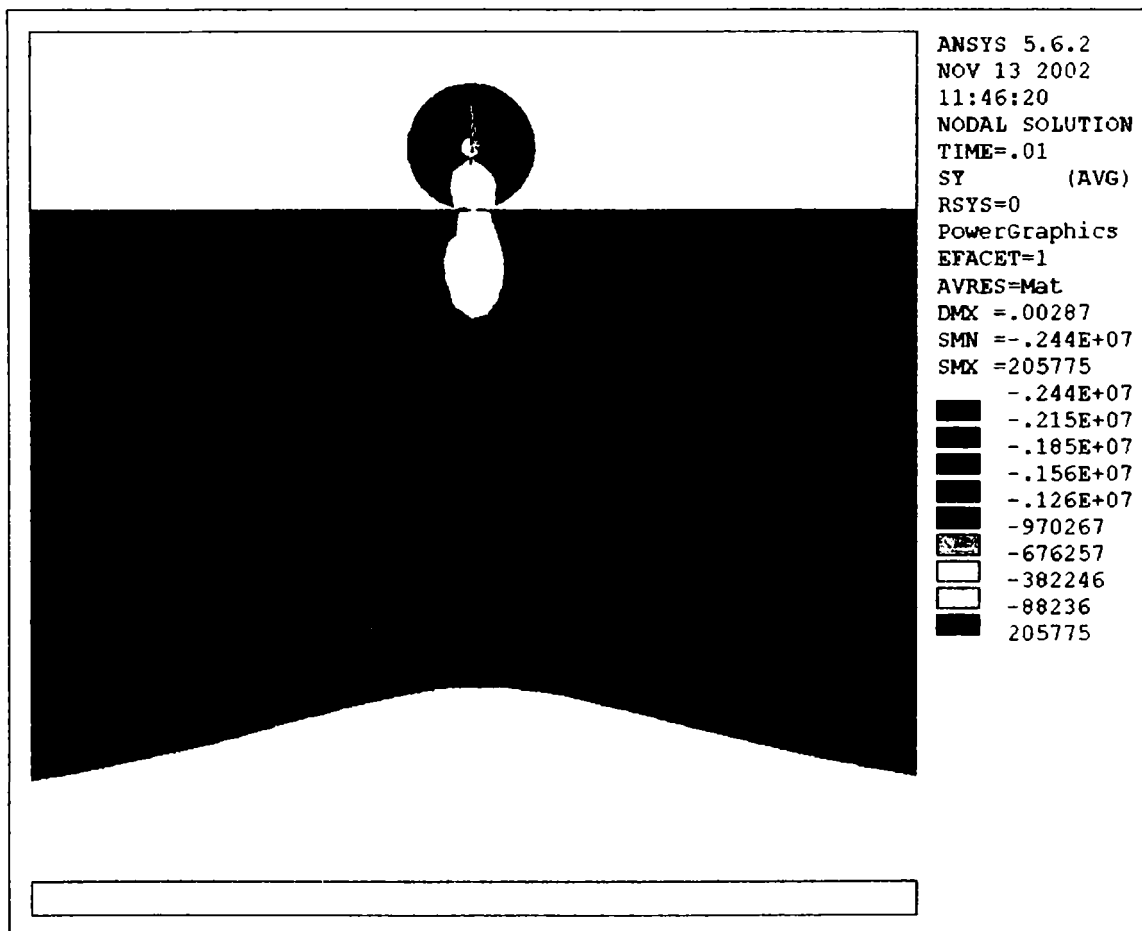


Figura 6.12 Spectrul tensiunii normale pe verticală [N/m²] pentru sistemul cu un grad de libertate cinematică

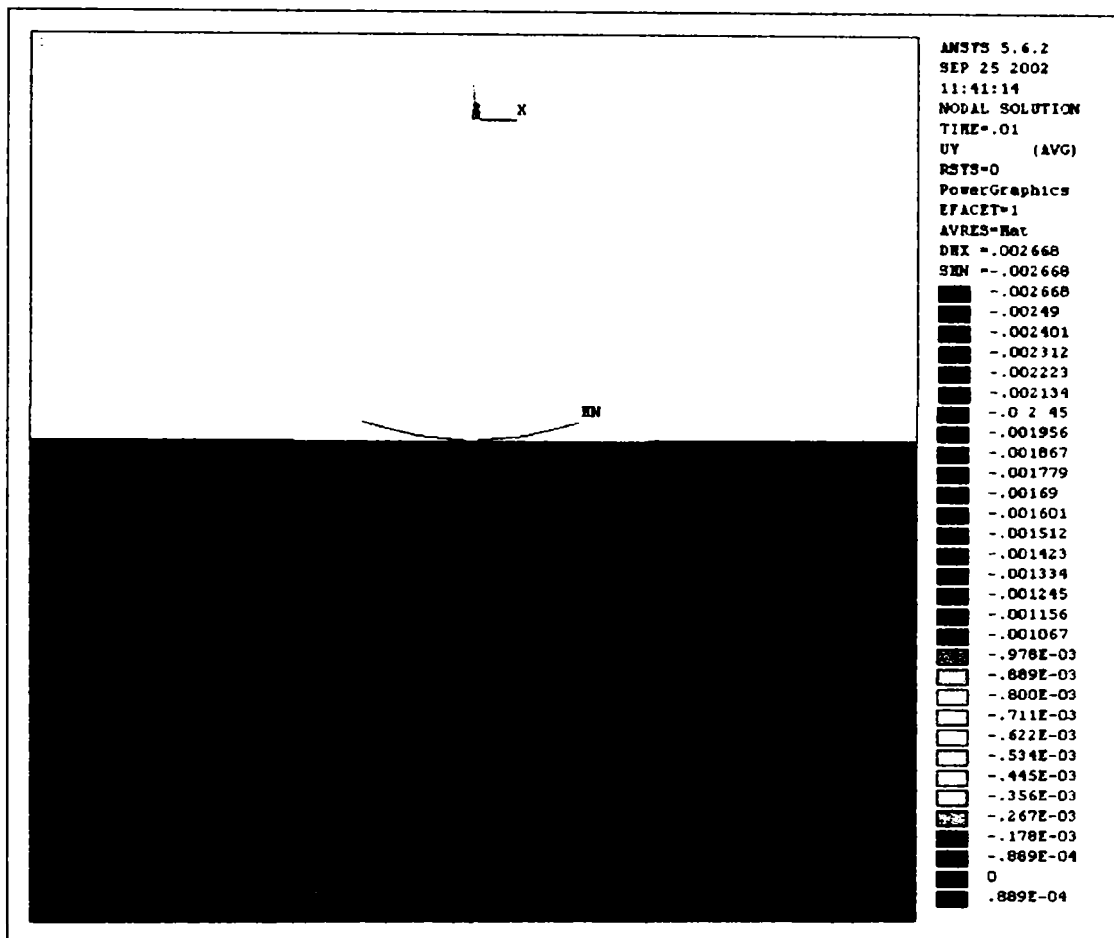


Figura 6.13 Detaliu în spectrul deplasării maxime pe verticală [m] pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică

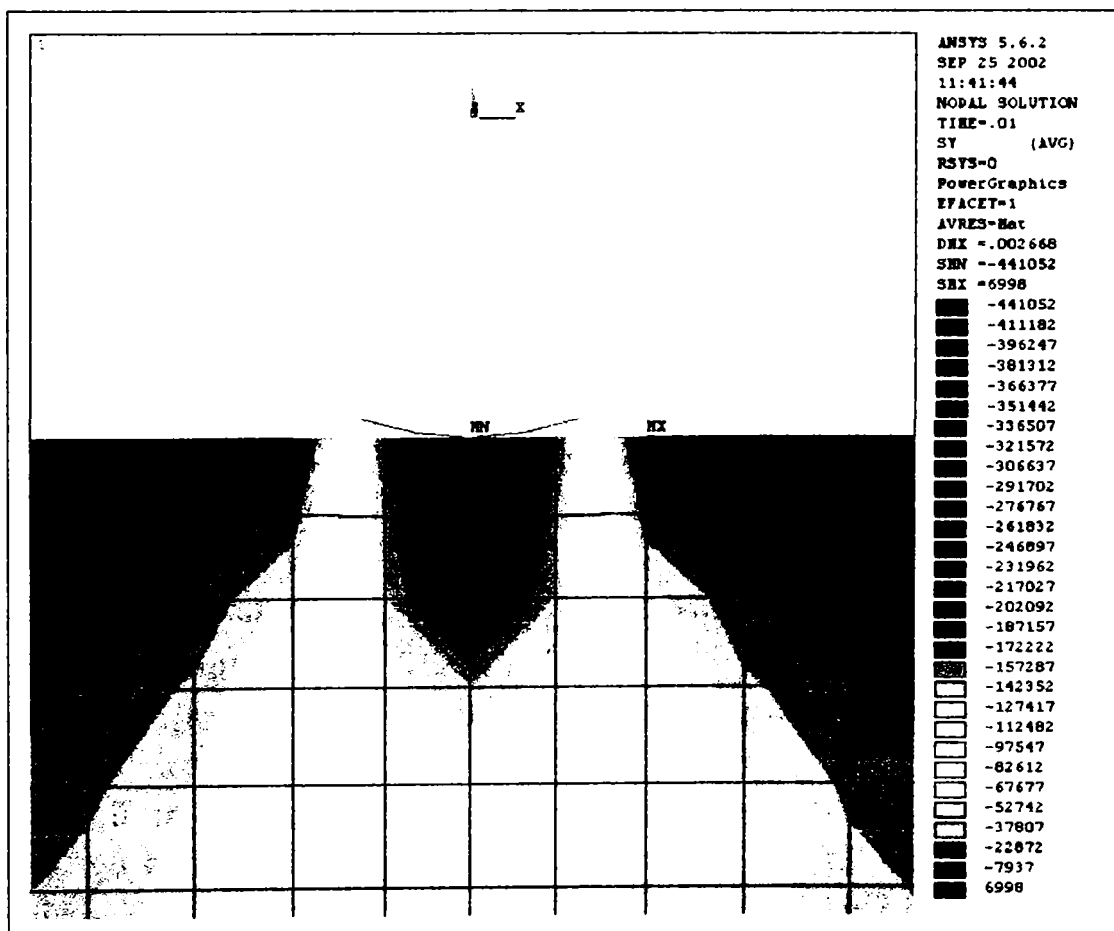


Figura 6.14 Detaliu în spectrul tensiunii normale pe verticală [N/m²] pentru sistemul cu două grade de libertate cinematică

Tabel 6.1

DEN. JOASA = 1524 kg/m ³				sistem 1-g-l-c		sistem 2-g-l-c	
w [%]	Go"wu" [kN/m ²]	k [kN/m]	c [kN.s/m]	Z [m]	U [m]	Zd [m]	Ud [m]
0	5.62E+04	9.11E+04	46.45	3.12E-03	2.78E-03	2.86E-03	2.64E-03
0.5	6.23E+04	9.96E+04	46.86	4.43E-03	2.51E-03	2.23E-03	2.39E-03
1	6.78E+04	1.07E+05	47.22	6.85E-03	2.31E-03	1.86E-03	2.19E-03
1.5	7.24E+04	1.14E+05	47.53	1.03E-02	2.16E-03	1.64E-03	2.05E-03
2	7.57E+04	1.18E+05	47.77	1.13E-02	2.06E-03	1.51E-03	1.96E-03
2.5	7.79E+04	1.21E+05	47.97	1.00E-02	2.01E-03	1.43E-03	1.91E-03
3	7.71E+04	1.20E+05	48.06	1.06E-02	2.03E-03	1.46E-03	1.93E-03
3.5	7.62E+04	1.19E+05	48.14	1.11E-02	2.05E-03	1.49E-03	1.95E-03
4	7.53E+04	1.18E+05	48.22	1.13E-02	2.08E-03	1.52E-03	1.97E-03
4.5	7.44E+04	1.17E+05	48.30	1.12E-02	2.10E-03	1.56E-03	2.00E-03
5	7.35E+04	1.15E+05	48.38	1.08E-02	2.13E-03	1.59E-03	2.02E-03
5.5	7.26E+04	1.14E+05	48.46	1.02E-02	2.15E-03	1.63E-03	2.05E-03
6	7.17E+04	1.13E+05	48.54	9.56E-03	2.18E-03	1.67E-03	2.07E-03
6.5	7.08E+04	1.12E+05	48.62	8.85E-03	2.21E-03	1.71E-03	2.10E-03
7	6.99E+04	1.10E+05	48.69	8.16E-03	2.24E-03	1.75E-03	2.13E-03
7.5	6.90E+04	1.09E+05	48.77	7.53E-03	2.27E-03	1.80E-03	2.15E-03
8	6.82E+04	1.08E+05	48.84	6.96E-03	2.29E-03	1.84E-03	2.18E-03
8.5	6.73E+04	1.07E+05	48.92	6.46E-03	2.32E-03	1.89E-03	2.21E-03
9	6.65E+04	1.06E+05	48.99	6.03E-03	2.35E-03	1.94E-03	2.23E-03
9.5	6.57E+04	1.04E+05	49.07	5.65E-03	2.38E-03	1.99E-03	2.26E-03
10	6.49E+04	1.03E+05	49.15	5.32E-03	2.41E-03	2.04E-03	2.29E-03
10.5	6.42E+04	1.02E+05	49.23	5.03E-03	2.43E-03	2.09E-03	2.31E-03
11	6.35E+04	1.01E+05	49.30	4.78E-03	2.46E-03	2.14E-03	2.34E-03
11.5	6.28E+04	1.00E+05	49.38	4.56E-03	2.49E-03	2.19E-03	2.37E-03
12	6.22E+04	9.95E+04	49.46	4.37E-03	2.51E-03	2.24E-03	2.39E-03
12.5	6.16E+04	9.87E+04	49.54	4.20E-03	2.54E-03	2.29E-03	2.41E-03
13	6.10E+04	9.79E+04	49.63	4.05E-03	2.56E-03	2.33E-03	2.44E-03
13.5	6.05E+04	9.71E+04	49.71	3.92E-03	2.58E-03	2.38E-03	2.46E-03
14	6.00E+04	9.64E+04	49.79	3.81E-03	2.60E-03	2.43E-03	2.48E-03

În figurile 6.15 și 6.16 se prezintă comparativ graficele de variație ale deplasării considerate pe verticală în funcție de conținutul de apă al materialului, în prima figură pentru densitatea joasă (1.524gr/cm³), iar în cea de-a doua pentru densitatea ridicată (1.644gr/cm³).

Se observă că în varianta sistemului considerat cu două grade de libertate cinematică, curba valorilor determinate prin modelarea numerică urmărește alura curbei corespunzătoare a valorilor obținute analitic, diferența între valori fiind sensibil mai mică în cazul densității joase.

Tabel 6.2

DEN. RIDICATA = 1644 kg/m ³				sistem 1-g-l-c		sistem 2-g-l-c	
w	Go''wu''	k	c	Z	U	Zd	Ud
[%]	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN.s/m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	6.88E+04	1.09E+05	48.84	7.38E-03	2.35E-03	1.81E-03	2.24E-03
0.5	7.77E+04	1.21E+05	49.33	9.99E-03	2.08E-03	1.44E-03	1.98E-03
1	8.55E+04	1.32E+05	49.74	5.25E-03	1.89E-03	1.22E-03	1.80E-03
1.5	9.14E+04	1.40E+05	50.06	3.63E-03	1.77E-03	1.10E-03	1.69E-03
2	9.45E+04	1.44E+05	50.29	3.10E-03	1.71E-03	1.04E-03	1.63E-03
2.5	9.43E+04	1.44E+05	50.40	3.13E-03	1.71E-03	1.04E-03	1.63E-03
3	9.30E+04	1.42E+05	50.48	3.33E-03	1.74E-03	1.07E-03	1.66E-03
3.5	9.17E+04	1.40E+05	50.56	3.56E-03	1.76E-03	1.09E-03	1.68E-03
4	9.04E+04	1.38E+05	50.64	3.83E-03	1.79E-03	1.12E-03	1.70E-03
4.5	8.90E+04	1.36E+05	50.72	4.14E-03	1.82E-03	1.14E-03	1.73E-03
5	8.77E+04	1.35E+05	50.79	4.50E-03	1.84E-03	1.17E-03	1.76E-03
5.5	8.64E+04	1.33E+05	50.86	4.92E-03	1.87E-03	1.20E-03	1.78E-03
6	8.50E+04	1.31E+05	50.94	5.41E-03	1.90E-03	1.23E-03	1.81E-03
6.5	8.37E+04	1.29E+05	51.01	5.97E-03	1.93E-03	1.26E-03	1.84E-03
7	8.25E+04	1.28E+05	51.08	6.60E-03	1.96E-03	1.30E-03	1.87E-03
7.5	8.13E+04	1.26E+05	51.16	7.30E-03	1.99E-03	1.33E-03	1.89E-03
8	8.01E+04	1.24E+05	51.23	8.05E-03	2.02E-03	1.36E-03	1.92E-03
8.5	7.90E+04	1.23E+05	51.30	8.81E-03	2.05E-03	1.40E-03	1.95E-03
9	7.79E+04	1.21E+05	51.38	9.52E-03	2.08E-03	1.43E-03	1.98E-03
9.5	7.69E+04	1.20E+05	51.46	1.01E-02	2.10E-03	1.46E-03	2.00E-03
10	7.60E+04	1.19E+05	51.54	1.04E-02	2.13E-03	1.50E-03	2.03E-03
10.5	7.51E+04	1.18E+05	51.62	1.05E-02	2.15E-03	1.53E-03	2.05E-03
11	7.43E+04	1.16E+05	51.70	1.04E-02	2.18E-03	1.56E-03	2.07E-03
11.5	7.36E+04	1.15E+05	51.78	1.02E-02	2.20E-03	1.59E-03	2.09E-03
12	7.29E+04	1.14E+05	51.87	9.83E-03	2.22E-03	1.61E-03	2.11E-03
12.5	7.23E+04	1.14E+05	51.96	9.46E-03	2.24E-03	1.64E-03	2.13E-03
13	7.17E+04	1.13E+05	52.05	9.09E-03	2.25E-03	1.66E-03	2.15E-03
13.5	7.12E+04	1.12E+05	52.15	8.75E-03	2.27E-03	1.69E-03	2.16E-03
14	7.08E+04	1.12E+05	52.24	8.45E-03	2.28E-03	1.71E-03	2.18E-03

În varianta sistemului cu un grad de libertate cinematică, variantă în care prin studiul analitic se arată că frecvența naturală de oscilație a cilindrului egalează în două puncte frecvența de operare a dispozitivului vibrator (vezi fig.5.4), curba deplasărilor determinate numeric nu mai urmărește curba corespunzătoare a deplasărilor obținute analitic. Curba valorilor obținute numeric păstrează și în acest caz alura comună, fără a prezenta influența unui efect de rezonanță. Acest lucru se datorează faptului că încărcarea modelată în trepte pe parcursul unei perioade T nu respectă în mod corespunzător acțiunea dinamică produsă de dispozitivul vibrator.

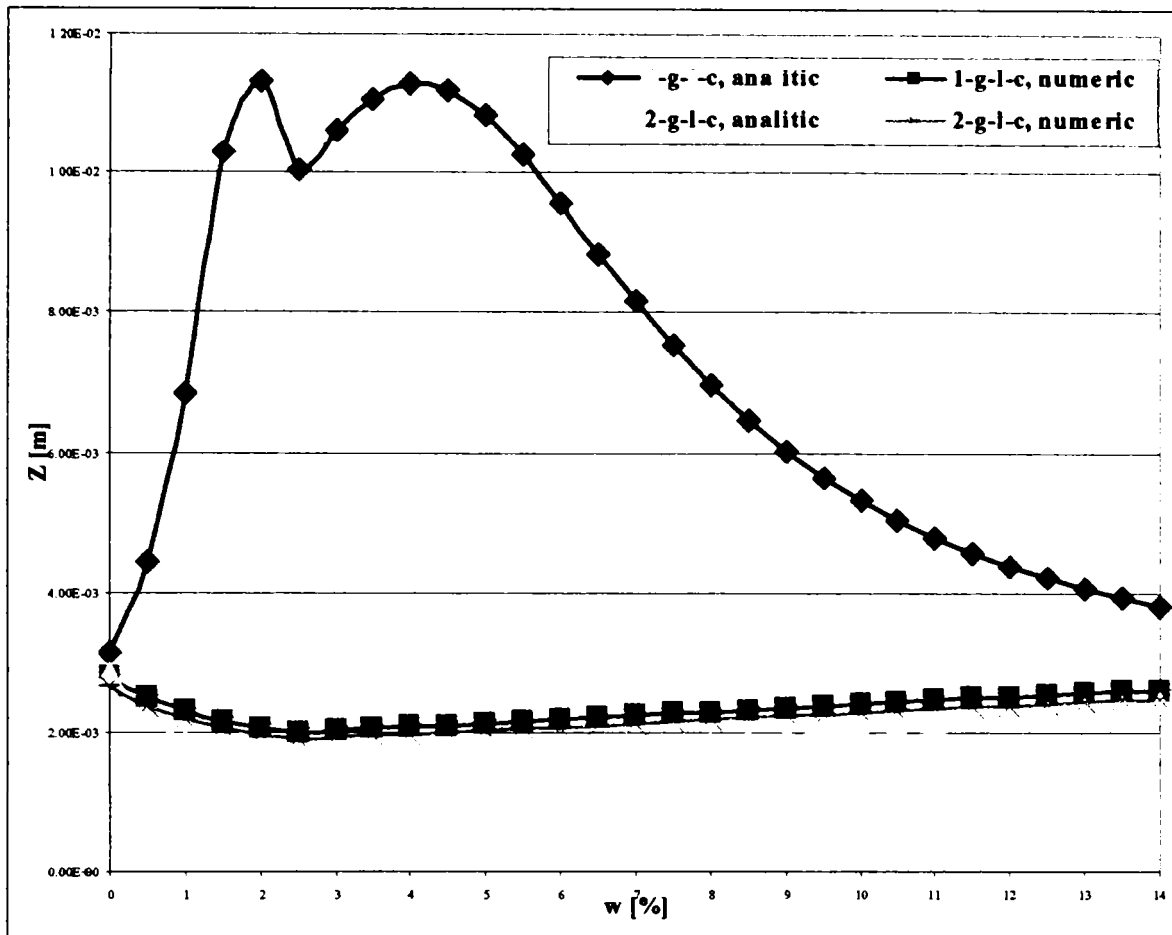


Figura 6.15 Variația deplasării maxime pe verticală cu conținutul de apă în cazul materialului cu densitate joasă

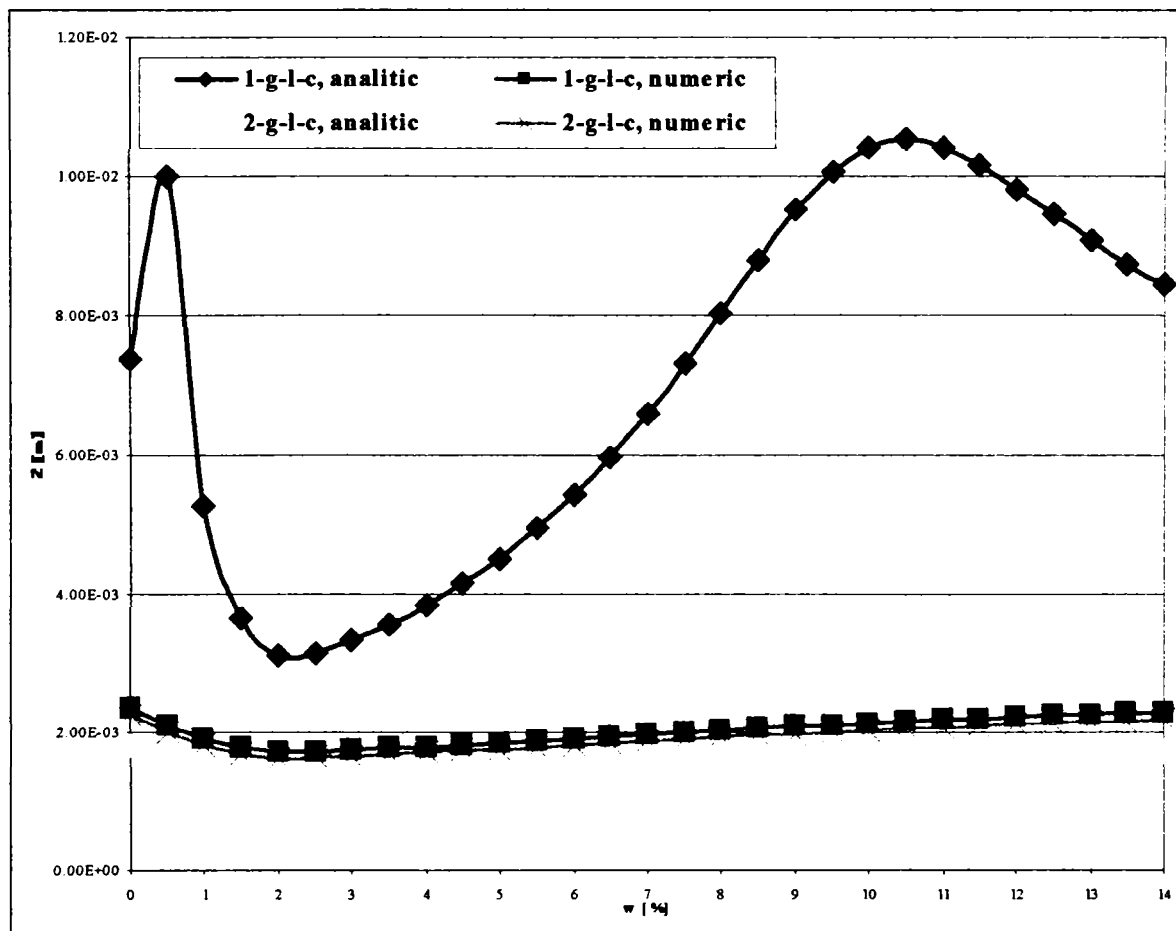


Figura 6.16 Variația deplasării maxime pe verticală cu conținutul de apă în cazul materialului cu densitate ridicată

În figurile 6.17 și 6.18 se prezintă comportarea pe parcursul perioadei de oscilare T , a deplasării și a tensiunii normale pe verticală, în câteva noduri respectiv elemente finite semnificative, aflate în dreptul axei de simetrie a modelului. Astfel, în imaginea ce se referă la deplasare, curbele notate cu s indică valorile în nodurile din sol (124, 218 și 219) pornind de pe linia de contact în jos, curba notată cu r indică valorile într-un nod (128) de pe diametrul vertical al cilindrului (ruloului), iar curba notată cu c indică valorile într-un nod (1088) situat pe piesa ce modelează cadrul. În imaginea ce se referă la tensiune, curbele indică valorile respective în sol, pornind de la nivelul de contact cu cilindrul în jos. Curbele din cele două imagini, prezentate ca exemplu al variației în timpul impus T , corespund variantei sistemului cu două grade de libertate cinematică, situația materialului de densitate joasă, complet uscat.

Se observă comportarea armonică a celor două mărimi ca o consecință a funcției încărcării. Deasemenea, se observă reducerea în adâncime a rezultatelor atașate materialului compactat precum și situarea în timp a valorilor extreme și a valorilor egale cu zero.

În concluzie se poate spune că modelarea numerică ajută la estimarea comportării unui sistem alcătuit dintr-un utilaj de compactare cu cilindru vibrator ce acționează asupra unui material granular fin în umplutură. Odată stabilită variația în timp a deplasării, prin integrare (vezi relația 3.25) se poate estima energia absorbită de sol pe parcursul acțiunii de compactare, mărime considerată ca parametru al sistemului Terrameter de Control Continuu al Compactării dinamice.

Pentru o mai bună apropiere a rezultatelor obținute prin modelarea numerică de o comportare reală a sistemului, sunt totuși necesare câteva îmbunătățiri ale modului de abordare a analizei cu elemente finite. Astfel, în afară de o discretizare mai fină a terenului, în special în zona de contact cu cilindrul, se recomandă modelarea încărcării dinamice direct prin funcția sinusoidală. În acest fel programul de calcul ar putea efectua o analiză mai corectă a răspunsului armonic al sistemului. Totodată, studiul acestui răspuns, mișcarea pe verticală a cilindrului vibrator, va trebui realizat pe parcursul a câtorva perioade de oscilație consecutive. În continuare, energia absorbită de sol se poate stabili fie sub forma unei medieri a valorilor calculate pentru perioadele de oscilație respective, fie sub forma unei valori determinate pentru două perioade semnificative consecutive.

Pasul următor în studiul prin elemente finite a comportării sistemului considerat este considerarea unei comportări elasto-plastice a materialului asupra căruia acționează cilindrul vibrator.

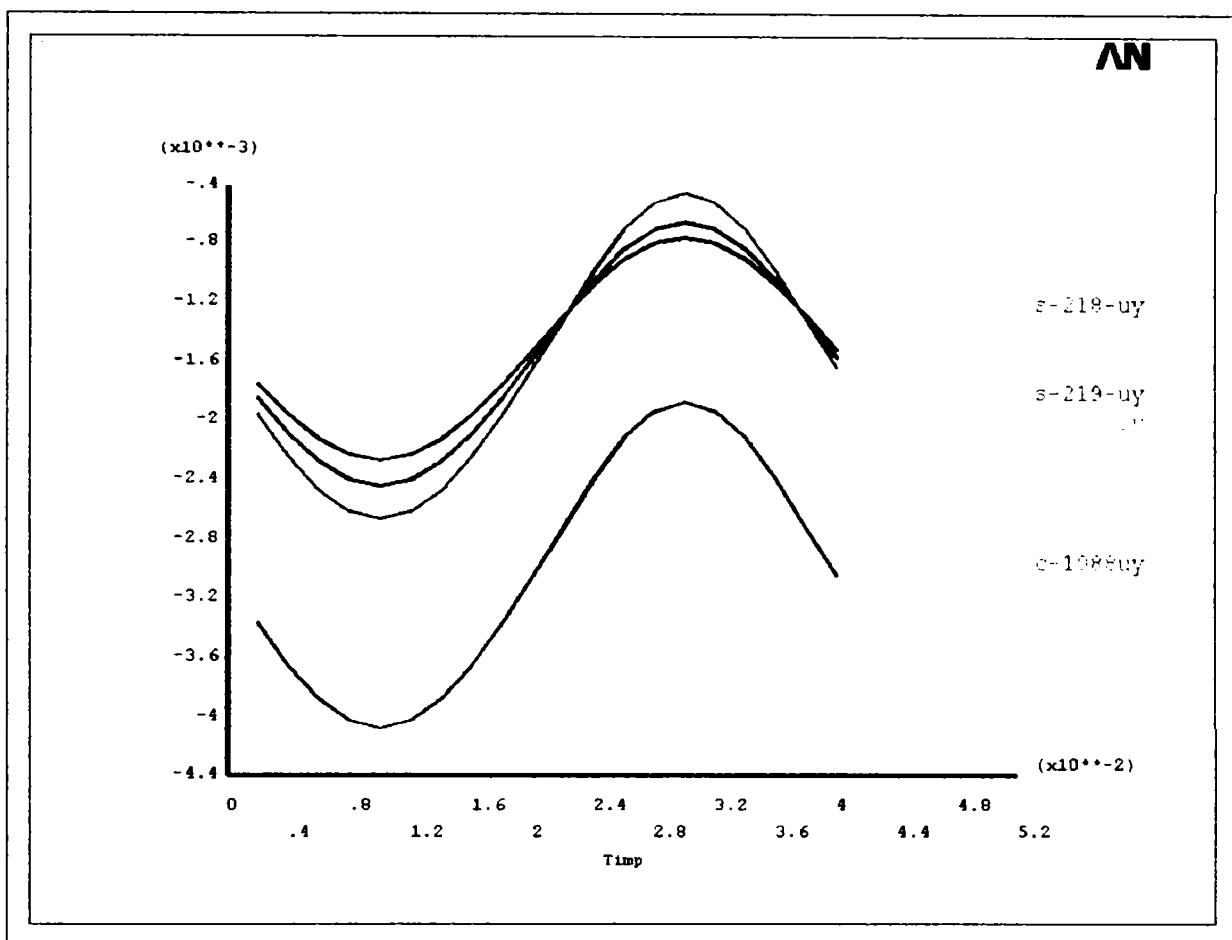


Figura 6.17 Variația deplasării pe verticală pe parcursul unei perioade de oscilație

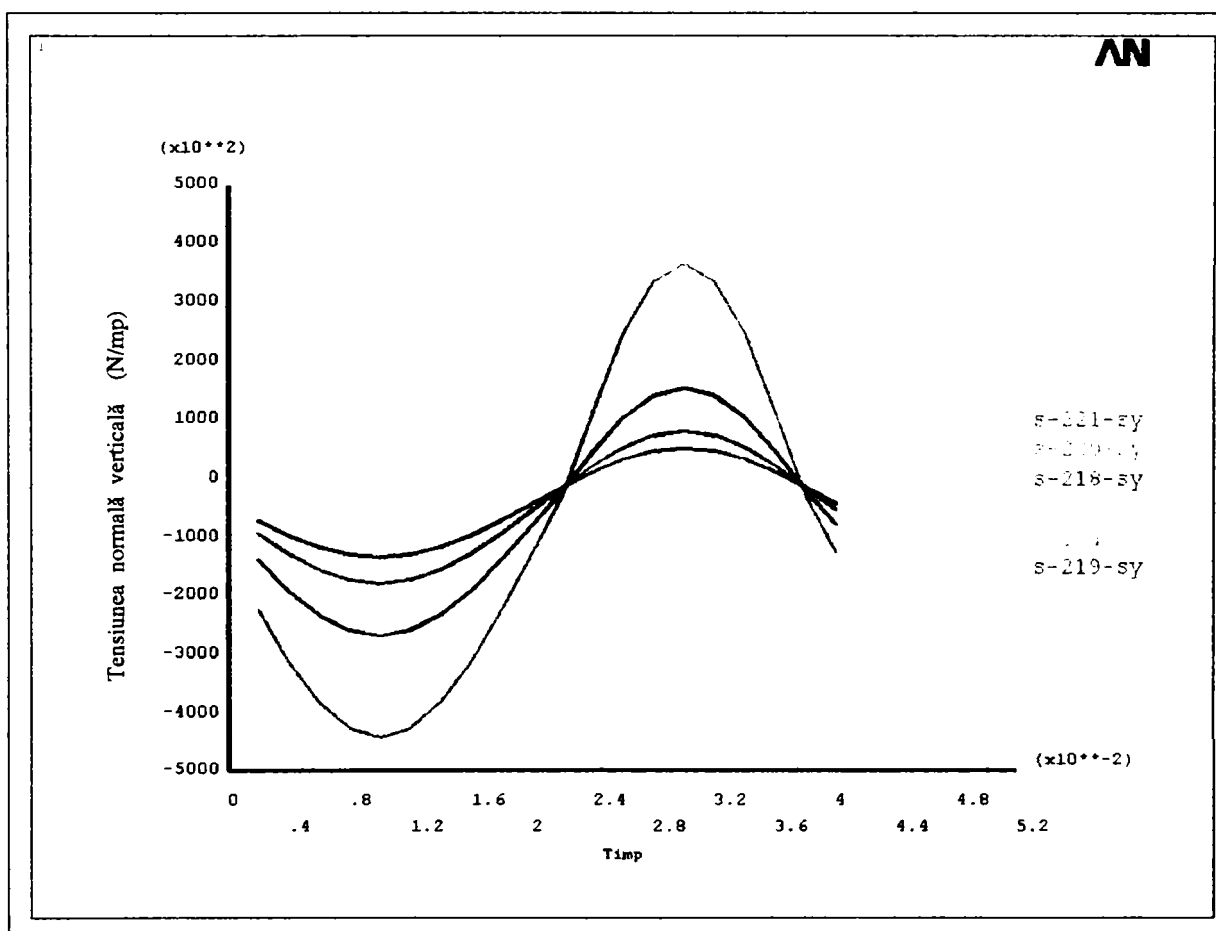


Figura 6.18 Variația tensiunii normale pe verticală pe parcursul unei perioade de oscilație

Capitolul 7

CONCLUZII/RECOMANDĂRI

7.1 Concluzii

Pe baza studiului realizat în privința influenței conținutului de apă asupra datelor furnizate de sistemul de control continuu al compactării nisipului cu cilindrul vibrator neted, se evidențiază următoarele concluzii principale:

- din rândul modelelor empirice găsite în literatură de specialitate, numai modelul *Wu et.al.* consideră contribuția directă a conținutului de apă (sub forma gradului de saturare) în estimarea modulului de rezistență la tăiere dinamică;
- testele efectuate în laborator arată că variația modulului maxim la tăiere dinamică cu conținutul de apă al nisipului poate fi evidențiată în mod corespunzător prin teste de vibrație prin torsiune liberă;
- comportarea modulului la tăiere dinamică stabilită pe baza testelor VTL confirmă variația obținută prin aplicarea modelului empiric *Wu et.al.*;
- energia absorbită de umplutura de nisip pe parcursul procesului de compactare cu cilindrul vibrator neted este în mod semnificativ influențată de conținutul de apă al materialului.

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 neted, este în general demonstrată și recunoscută în literatură 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 în estimarea prealabilă a rezultatelor practice ale lucrărilor de compactare. Un singur material bibliografic, bazându-se pe rezultatele unui mare număr de teste in-situ (Parsons, 1992), prezintă o serie de ecuații de corelare. Pentru a atinge un nivel de compactare corespunzător unui tip specific de pământ, aceste ecuații indică numărul necesar de treceri a utilajului de compactare în funcție de tipul acestuia și de conținutul de apă al materialului compactat. Din nefericire,

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.

În ceea ce privește caracteristicile dinamice ale nisipurilor, complexitatea fenomenului, în care sunt implicați diverși factori (amplitudinea deformațiilor specifice, presiunea efectivă, densitatea în stare uscată, indicele porilor, conținutul de apă, caracteristicile granulelor), a condus la elaborarea câtorva modele empirice distincte. Chiar dacă autorii acestor modele consideră că s-au atins corelații bune între rezultate, având în vedere că fiecare model consideră doar unii dintre parametrii implicați (în general diferiți de la un model la altul), calculele pentru determinarea modulului de rezistență la tăiere dinamică conduc la valori sensibil diferite. Mai mult, nici unul din aceste modele nu ia în considerare și efectul modificării frecvenței de oscilație.

Datele obținute prin studiul literaturii de specialitate arată interesul ridicat acordat sistemului de Control Continuu al Compactării de către specialiștii în domeniu. Acest sistem de estimare a gradului de compactare chiar pe parcursul desfășurării procesului de compactare cu cilindrii vibratorii netezi a fost patentat cu circa 24 de ani în urmă (Thurner, 1978), iar la ora actuală intră din ce în ce mai mult în practică. Datorită avantajelor (informații instantanee și eficiente referitoare la suprafața compactată, nivel ridicat de uniformitate a rezultatului compactării) pe care le prezintă în comparație cu metodele clasice de testare punctiformă pentru determinarea densității sau a rigidității unei umpluturi de material compactat, sistemul CCC devine tot mai popular. Ca o consecință literatura tehnică de specialitate este continuu îmbogățită. Totuși, chiar dacă principiul sistemului este clar stabilit, unele aspecte specifice, și nu fără importanță, cum ar fi relația de legătură dintre parametrii CCC și conținutul de apă al nisipului fin compactat, nu au fost încă direct abordate.

Testele efectuate prin Vibrare prin Torsiune Liberă asupra epruvetelor de nisip fin, pentru diferite niveluri al conținutului de apă (0, 4, 6, 8 și 12%), cu două valori ale densității în stare uscată (1.52 și 1.64 gr/cm^3) și la diferite frecvențe de oscilare, arată în mod clar influența importantă a acestor parametrii asupra modulului de rezistență la tăiere dinamică. Deasemenea rezultatele testelor evidențiază corelația frecvenței naturale de oscilație cu nivelul masei greutăților adiționale pe brațul de torsiune, respectiv variația acestei frecvențe cu conținutul de apă la diferite valori ale densității în stare uscată.

Întrucât nu au fost efectuate suficiente măsurători, în special pentru niveluri foarte scăzute ale conținutului de apă (între starea complet uscată și cca 4 %), valorile obținute pentru modulul de rezistență au fost comparate cu valori calculate prin intermediul modelului *Wu et.al.* numai

pentru aripa descendentă a curbei $G_o - w$. Cea mai bună corelație s-a obținut pentru situația cu 2x5 kg masă adițională pe brațul de acționare, la ambele valori ale densității în stare uscată. Corelații bune au fost deasemenea obținute pentru toate valorile corespunzătoare densității în stare uscată joasă.

Rezultatele corespunzătoare testelor efectuate asupra epruvetelor de densitate în stare uscată ridicată, cu un conținut de apă de cca 4 % și pentru o masă adițională de 0 și 2x10 kg, reprezintă excepții de la comportarea general considerată a modulului de rezistență la tăiere dinamică. Valorile obținute corespunzător acestor situații, chiar dacă sunt așa cum este normal mai mari decât valorile corespunzătoare stării perfect uscate a materialului, sunt mult mai mici decât nivelul așteptat. Nu a fost definită o explicație imediată a acestei comportări, și deci pentru clarificare este probabil necesară efectuarea mai multor teste.

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 (valoarea compactării indicată prin sistemul CCC Terameter). Calculele au considerat modelul unui utilaj de compactare CH-43 cu cilindru vibrator neted ce lucrează asupra unei depuneri de nisip fin, în două situații: sistem cu unul, respectiv cu două grade de libertate cinematică. În aplicația practică dezvoltată deformația materialului compactat a fost considerată ca fiind în totalitate elastică.

Influența caracteristicilor nisipului compactat (printre care și conținutul de apă) asupra răspunsului sistemului se exercită prin intermediul coeficienților de elasticitate și vâscozitate k și c .

Așa cum a fost preconizat, din graficele obținute rezultă că energia absorbită de material pe parcursul procesului de compactare prezintă vârfuri ce corespund situațiilor când frecvența de operare are aproximativ aceeași valoare cu frecvența naturală de oscilație. Pornind de la acest lucru, se trage concluzia că, pentru un anumit tip de nisip ce prezintă anumite condiții de densitate și conținut de apă, este important ca frecvența de operare să fie reglată în jurul nivelului frecvenței naturale de oscilație corespunzătoare umpluturii respective. În cazul în care dispozitivul vibrator al utilajului de compactare poate dezvolta o frecvență de operare unică, eficiența optimă a procesului de compactare poate fi atinsă prin modificarea conținutului de apă al umpluturii până în zona nivelului la care curba frecvenței naturale de oscilație intersectează valoarea frecvenței de operare. Realizarea lucrărilor de compactare asupra unui nisip cu caracteristici corespunzătoare va determina valori maxime ale energiei absorbite de către 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.

Analiza prin intermediul programului de calcul ANSYS, a fost aplicată unui model în elemente finite construit în plan respectând aceleași condiții, referitoare la alcătuire, dimensiuni și calități ale materialelor, cu cele considerate în studiul analitic (Capitolul 5). În aceste condiții a fost stabilită comportarea sistemului pe parcursul unei singure perioade de oscilație, încărcarea dinamică aferentă fiind modelată în trepte succesive.

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, înseamnă că modelarea încărcării dinamice, respectiv procedeul de analiză aplicat, sunt deficitare.

7.2 Recomandări

În vederea continuării studiului în subiectul abordat de lucrarea de față, influența diversilor parametri asupra datelor furnizate de un sistem de control continuu al compactării dinamice, se propun următoarele recomandări generale:

- pe parcursul unei continue consultări a literaturii de specialitate din domeniul studiat, se recomandă acordarea unei atenții deosebite lucrărilor și rapoartelor întocmite de către constructorii implicați în domeniu și de către producătorii de utilaje de compactare;
- efectuarea unui număr mai mare de teste de vibrație prin torsiune liberă sau de alt tip pentru determinarea caracteristicilor dinamice ale pământurilor granulare fine de diverse tipuri și cu diferite valori ale parametrilor implicați: conținut de apă (în special în zona 0 – 6 %), densitate în stare uscată, frecvență de oscilare (în special în domeniul frecvențelor de operare dezvoltate de cilindrii vibratorii), presiune efectivă; totodată, în vederea îmbunătățirii performanțelor testelor, se recomandă o urmărire atentă a omogenității epruvetelor în ceea ce privește densitatea și conținutul de apă;
- îmbunătățirea practică a modelului analitic dezvoltat pentru sistemul material compactat – cilindru vibrator prin considerarea diferitelor faze de operare ce se dezvoltă pe parcursul procesului de compactare dinamică, respectiv prin considerarea comportării plastice pe parcursul desfășurării fenomenului;
- perfecționarea analizării cu ajutorul elementelor finite prin modelarea încărcării dinamice direct prin funcția sinusoidală, modelarea comportării elasto-plastice a materialului compactat, o discretizare mai fină în special în zona de contact;
- compararea și corelarea rezultatelor dezvoltărilor analitice și numerice cu cât mai multe rezultate de teste (măsurători) in-situ efectuate pentru diverse utilaje ce lucrează în diferite condiții de pământuri granulare.

Contribuții personale

- Realizarea pe baza bibliografiei momentului pe plan internațional, a unei sinteze a informațiilor privind influența conținutului de apă dintr-un material granular asupra rezultatelor compactării.
- Evidențierea unui model matematic privind conlucrarea dinamică a cilindrului vibrator și a materialului compactat.
- Efectuarea nemijlocită a studiilor de laborator privind determinarea modulului de rezistență la tăiere dinamică a materialului granular fin.
- Verificarea rezultatelor măsurărilor de laborator prin comparare cu rezultate obținute pe baza unei metode empirice corespunzătoare.
- Stabilirea analitică a corelației dintre parametrul sistemului de Control Continuu al Compactării și conținutul de apă al nisipului în ambele variante considerate pentru modelul dinamic (cazul cu unul, respectiv cu două grade de libertate).
- Analiza numerică a sistemului cilindru vibrator – material compactat bazată pe metoda elementelor finite, prin care se confirmă comportarea reflectată de rezultatele analitice obținute aplicând ecuațiile tradiționale prelucrate conform metodologiei proprii.
- Sugerarea unui procedeu practic privind eficientizarea procesului compactării cu cilindrul vibrator, fie prin influențarea umidității inițiale, fie prin modificarea parametrilor dispozitivului vibrator, în vederea obținerii rezultatelor scontate în ceea ce privește efectul compactării.

ANEXE

A

Mărimi fundamentale implicate în fenomenul compactării (Lubking, 2000)

- 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 a 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

ρ_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

$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \times 100 \quad (\%)$$

- ca indice al densității

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (\%)$$

în care:

n_{\max} și n_{\min} sunt porozitatea maximă, respectiv minimă, determinate prin teste standard

e_{\max} și e_{\min} sunt indicii porilor maxim, respectiv minim, determinate prin teste standard

n și e sunt porozitatea, respectiv indicii porilor, in-situ.

Relația de legătură între cele două este:

$$\frac{I_D}{D} = \frac{\rho_{d\max}}{\rho_d}$$

în care:

$\rho_{d\max}$ este densitatea maximă în starea perfect uscată determinată prin același test standard (de obicei testul Proctor) ca și n_{\min} și e_{\min} .

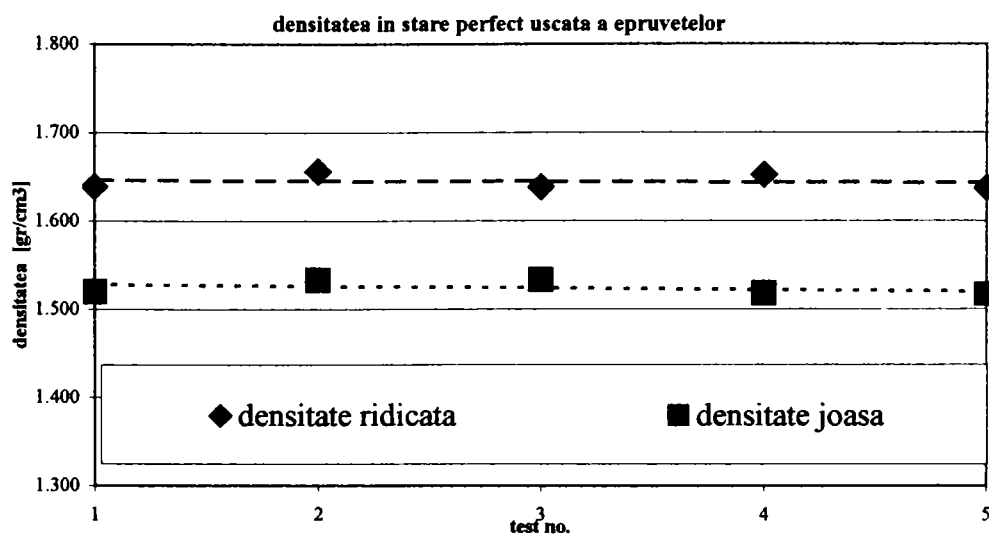
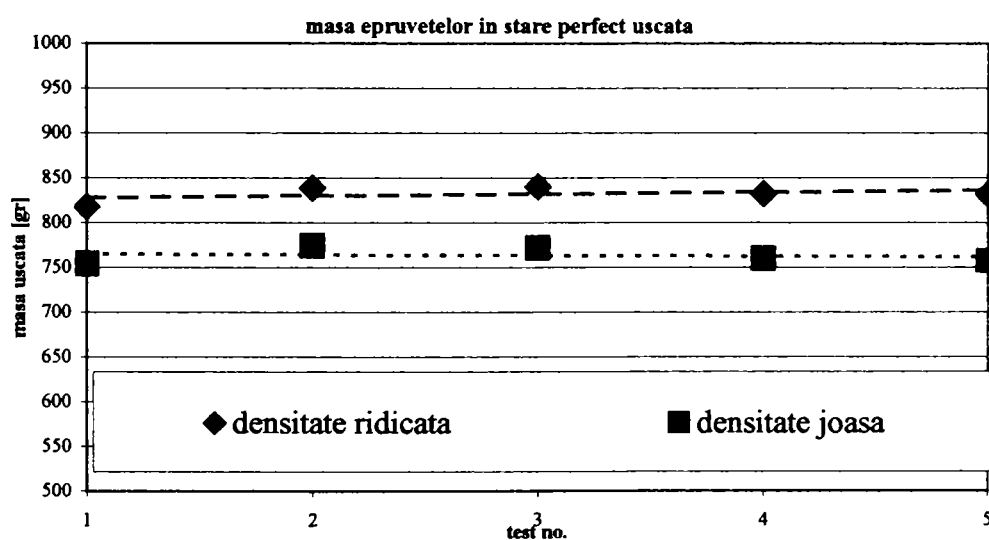
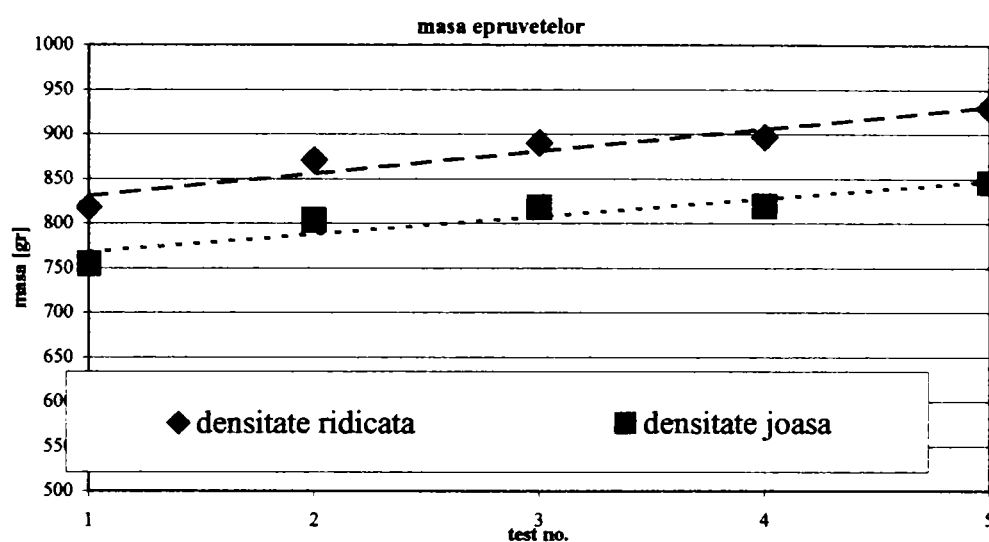
ρ_d este densitatea in-situ în stare perfect uscată.

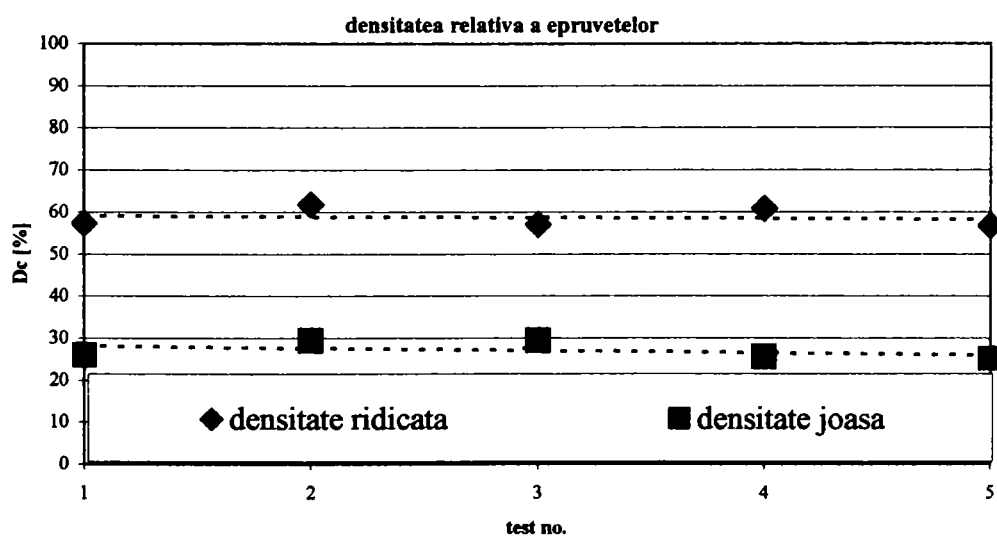
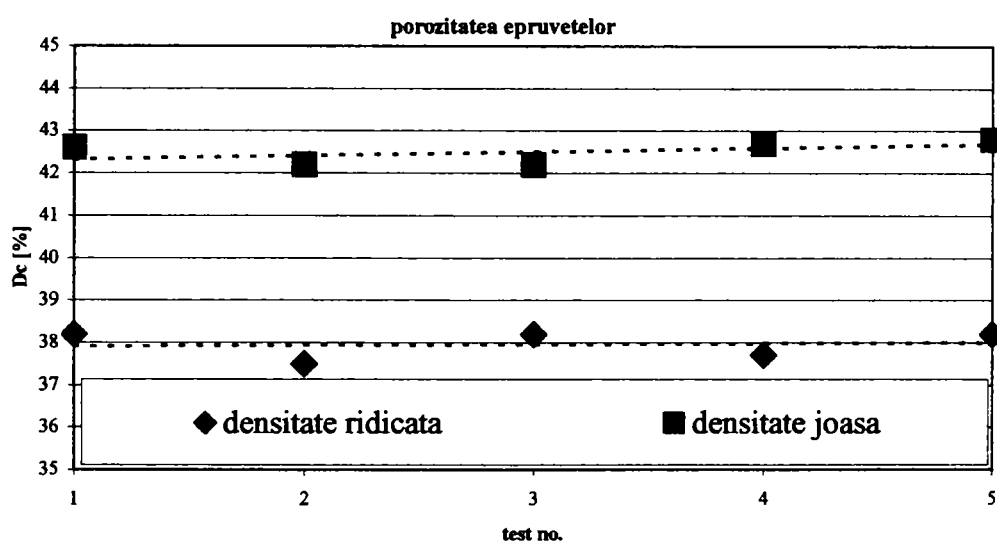
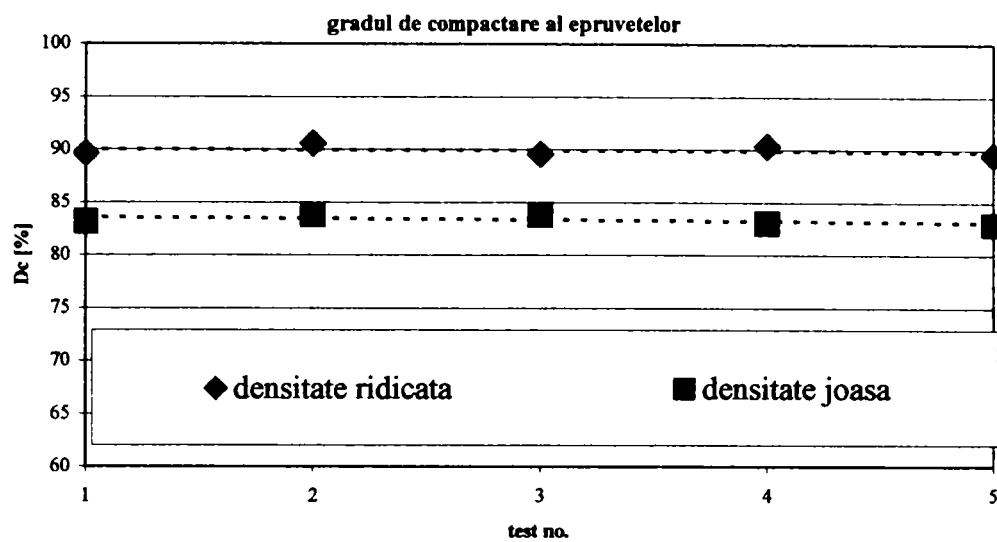
Gradul de compactare se definește prin intermediul următoarei relații:

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{d\max}} \times 100 \quad (\%)$$

B

Caracteristicile epruvetelor de nisip pregătite pentru efectuarea testelor de Vibrare prin Torsiune Liberă





BIBLIOGRAFIE

Adam, D. (1997). "Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Roller", GeoEnvironment 97, Bouazza, Balkema Rotterdam

Adam, D., Kopf, F. (2000). "Sophisticated Roller Compaction Technologies and Roller-Integrated Compaction Control", Compaction of Soils, Granulates and Powders, Ed. Kolymbas & Fellin, Rotterdam.

Adam, D., Kopf, F. (2000). "Theoretical Analysis of Dynamically Loaded Soils", European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, p.p. 3-16

Anderegg, R. (2000). "ACE AMMANN Compaction Expert – Automatic Control of the Compaction", European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, p.p. 229-236

Berg, P., Postma, T.R., Zorn, N.F. (1986). "Mechanics of Dynamic Compaction", Phase II, Delft Soil Mechanics Laboratory.

Brandl, H., Adam, D. (1997). "Sophisticated Continuous Compaction Control of Soils and Granular Materials", Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, September 6-12, vol.1, Hamburg, Germany, p.p.31-36

CROMB (2002). "Dams in Romania", București, Romania

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.

D'Appolonia, E. (1970). "Dynamic Loadings", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 96 (SM1).

Das, B.M. (1983). "Fundamentals of Soil Dynamics", Elsevier Science Publishing Co., New York

Das, B.M. (1990). "Fundamentals of Geotechnical Engineering", Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, USA

Edil, T.B., Luh, G.-F. (1978). "Dynamic Modulus and Damping Relationships for Sands", Proceedings of the ASCE Geotechnical

Engineering Division Specialty Conference, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, CA, p.p. 394-409

Floss, R., Kloubert, H.-J. (2000). "Newest Developments in Compaction Technology", European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, p.p. 247-261

Forsblad, L. (1981). "Vibratory Soil and Rock Fill Compaction", Robert Olsson Tryckeri AB, Stockholm, Sweden

Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1971, 1972). "The Behavior of Shear Modulus and Damping Ratio for Soils"

Hardin, B.O. (1978). "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

Johnson, A.W., Sallberg, J.R. (1960). "Factors that Influence Field Compaction of Soils", Highway Research Board, Bulletin 272, Washington D.C.

Kutzner, C. (1997). "Earth and Rockfill Dams; Principles of Design and Construction", Balkema Rotterdam

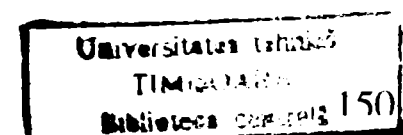
Lubking, P. (1999). "Soil Mechanics", Lecture notes in Master Program on Underground Space Technology, IHE Delft.

Mancuso, C., Vassallo, R., d'Onofrio, A. (2000). "Soil Behavior in Suction Controlled Cyclic and Dynamic Torsional Shear Tests", Unsaturated Soils for Asia, Rahardjo, Balkema Rotterdam

Monahan, E.J. (1986). "Construction Of and On Compacted Fills", John Wiley & Sons, New York.

Nicoară, Ș.V., Constantin A.T. (2001). "Dynamic characteristics of sands", Buletinul științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1

Nicoară, Ș.V., Constantin A.T. (2001). "Granular soils compaction by vibratory rollers", Buletinul științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1



- Nicoară, Ș.V., Constantin A.T. (2001). "The influence of moisture content in the compaction of sand", Buletinul științific al UPT, Seria Hidrotehnică, Tomul 46 (60) - fascicola 1
- 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.
- Parsons, A.W. (1992). "Compaction of Soils and Granular Materials: A Review of Research Performed at the Transport Research Laboratory", HSMO, London.
- Popa, Gh., Nicoară, Ș.V. (2002). "Dynamic Shear Modulus Determination by Free Torsion Vibration Tests", Analele Universității "Ovidius" Constanța – ediție specială consacrată lucrărilor simpozionului cu participare internațională - 25 de ani de învățământ superior de construcții la Constanța, 18-20 aprilie 2002
- Popa, Gh., Nicoară, Ș.V. (2002). "Study of a Soil - Vibratory Roller System Response", Analele Universității "Ovidius" Constanța – ediție specială consacrată lucrărilor simpozionului cu participare internațională - 25 de ani de învățământ superior de construcții la Constanța, 18-20 aprilie 2002
- Popovici, A. (2002). "Baraje pentru Acumulări de Ape" Vol.II, Editura Tehnică, București, Romania
- Qian, X., Gray, D.H., Woods, R.D. (1991) "Resonant Column Tests on Partially Saturated Sands", Geotechnics, Test. Journal, ASCE, 14(3), p.p. 266-275
- Richart jr., F.E., Woods, R.D., Hall jr., J.R. (1970). "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Sandström, A. (1998). "Control of Compacting Machine with a Measurement of the Characteristics of the Ground Material", United States Patent no. 5,727,900, March 17th
- SAS IP. (2001). "Documentation; Theory Reference", ANSYS Inc. Company, United States
- Selig, E.T., Yoo, T.S. (1977). "Fundamentals of Vibratory Roller Behavior", Proceedings, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, Japan.

- Selig, E.T., Yoo, T.S. (1979). "Dynamics of Vibratory Roller Compaction", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.
- Selig, E.T., Yoo, T.S. (1980). "New Concepts for Vibratory Compaction of Soil", Proceedings International Conference on Compaction, Vol.2, Paris.
- Selig, E.T. (1982). "Compaction Procedures, Specifications and Control Considerations", Earthwork Compaction, Transportation Research Record 897, Washington D.C.
- Selig, E.T., Yoo, T.S. (1982). "Compaction Effects of Oscillating Rollers", Earthwork Compaction, Transportation Research Record 897, Washington D.C.
- Turner, H.F. (1978). "Method and a Device for Ascertaining the Degree of Compaction of a Bed of Material with a Vibratory Compacting Device", United States Patent no. 4,103,554, August 1st
- Turner, H.F., Sandström, A. (1980). "A New Device for Instant Compaction Control", International Conference on Compaction, Paris, p.p. 611-614
- Turner, H.F. (2001). "Quality Assurance and Self Control in Road Construction; Advanced Measurement Technology", Geodynamik AB, Stockholm, Sweden, <http://www.geodynamik.com>
- Turner, H.F., Sandström, A (2000). "Continuous Compaction Control, CCC", European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Paris, May 19th, p.p. 237-246
- Viggiani, G., Atkinson, J.H. (1995). "Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains", Géotechnique 45, no.2, p.p. 249-265
- Wolf, J.P. (1994). "Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Wu, S., Gray, D.H., Richart jr., F.E. (1984). "Capillary Effects on Dynamic Modulus of Sands and Silts", Journal of Geotechnical Engineering, vol.110, no.9, ASCE, p.p. 1188-1203
- Wu, S., Gray, D.H., Richart jr., F.E. (1985). "Capillary Effects on Shear Modulus at High Strains", Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12-16 August, San Francisco, Balkema Rotterdam

PREZENTAREA SINTETICĂ A SUSȚINERII TEZEI

UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ" DIN TIMIȘOARA

CONTRIBUȚII LA COMPACTAREA MEDIILOR POROASE ÎN CONSTRUCȚIILE DE RETENȚIE

Doctorand:

Ș.I.ing. Șerban-Vlad NICOARĂ

Conducător științific:

Prof.dr.ing. Gheorghe POPA

- Facultatea de Hidrotehnică din Timișoara -
Februarie 2003

INTRODUCERE

- baraje, diguri, din materiale locale
- materiale granulare fine (nisipuri)
- compactarea dinamică cilindrii vibrator
- control continuu al compactării – CCC
- conținutul de apă



relația dintre sistemul integrat de control continuu al compactării și conținutul de apă al unui pământ granular utilizat la realizarea unei umpluturi

1 INTRODUCERE

2 NOȚIUNI GENERALE REFERITOARE LA REALIZAREA BARAJELOR DIN MATERIALE LOCALE

3 UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

4 DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ DINAMIC LA TĂIERE

5 STABILIREA CORELAȚIEI ANALITICE DINTRE PARAMETRUL CCC ȘI CONȚINUTUL DE APĂ AL NISIPULUI

6 ANALIZA NUMERICĂ A SISTEMULUI CILINDRU VIBRATOR – MATERIAL COMPACTAT

7 CONCLUZII / RECOMANDĂRI

Cap.2 NOȚIUNI GENERALE REFERITOARE LA REALIZAREA BARAJELOR DIN MATERIALE LOCALE

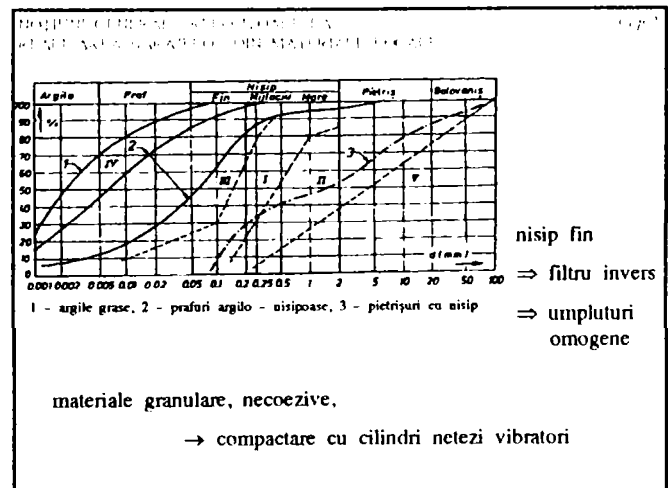
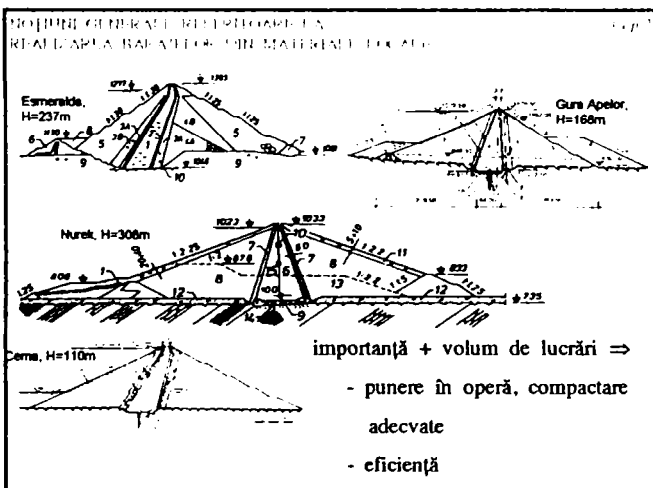


Umplutura

- piatră: anrocamente, bolovani
- pământuri: balast, nisip, nisip argilos, argilă nisipoasă, argilă

funcțiuni: stabilitate + etanșare

- baraj omogen
- baraj neomogen cu mască / cu nucleu



Cap.3 UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

modelul matematic al cilindrului vibrator

$(m_d + m_c)\ddot{z}_d + c_1(\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_1(z_d - z_f) = m_d e \omega^2 \sin \omega t - F_s$
 $m_f \ddot{z}_f - c_1(\dot{z}_d - \dot{z}_f) - k_1(z_d - z_f) = 0$
 $\dots, \ddot{z}_d = \dots, e \omega^2 \sin \omega t - F_s$

încărcare $F_s = F_0 + F_p$
 descărcare $F_s = F_0$
 salt $F_s = 0$

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

deplasarea cilindrului

forță în rată
 rigiditatea solului
 rigiditatea suspensiei
 greutatea cilindrului
 vâscozitatea suspensiei
 vâscozitatea solului
 greutatea cilindrului

tipul mișcării	interacțiunea cilindru - sol	nr. cicluri	condiție de operare	rigiditatea solului
periodică	contact	1	CONTACT CONTINUU	scăzută
	pierdere parțială a contactului	1	DESPRINDERE PARȚIALĂ	
		2 (4)	DUBLU SALT	
			MIȘCARE NEREGULATĂ	
haotică			MIȘCARE HAOTICĂ	ridicată

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

modelarea solurilor necoezive încărcate dinamic vertical

modelarea comportării elastice

$k = G b_0 \frac{1}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^{0.75} + 1.6 \right]$
 $c = 4 a_0 b_0 \sqrt{2 \rho G \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$

modelarea comportării plastice

$F_p = k_p z_p = k_p (z_d - z_0)$
 $k_p = 16 \gamma N, ar$

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

metode clasice (punctuale) de control in-situ a compactării

- densitatea
- metoda înlocuirii cu nisip
- metoda balonului de cauciuc
- metoda nucleară
- rigiditatea stratului compactat
- ...etc. metoda st. apa. il.

cilindru vibrator cu sistem de control integrat

→ control continuu al compactării (CCC)

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

sistemul CCC Terrameter

$W_d = \int_{2r} F_s \dot{z} dt = \int_{2r} (c\dot{z} + k z) \dot{z} dt$

1 Sistem de măsurare cu imprimantă și panou de operare
 2 Sistem de operare cu afișaj digital, sistem de memorare și computer de bord

UTILIZAREA CILINDRULUI VIBRATOR ÎN COMPACTAREA MATERIALELOR GRANULARE

caracteristici dinamice ale nisipurilor

modulul de rezistență la tăiere G
 raportul de vâscozitate D

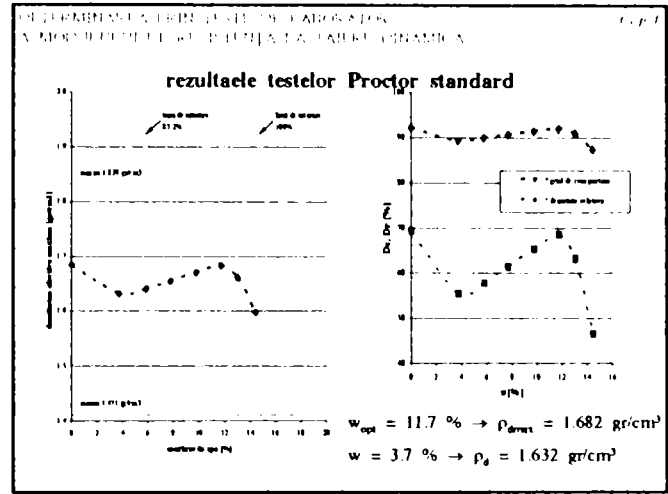
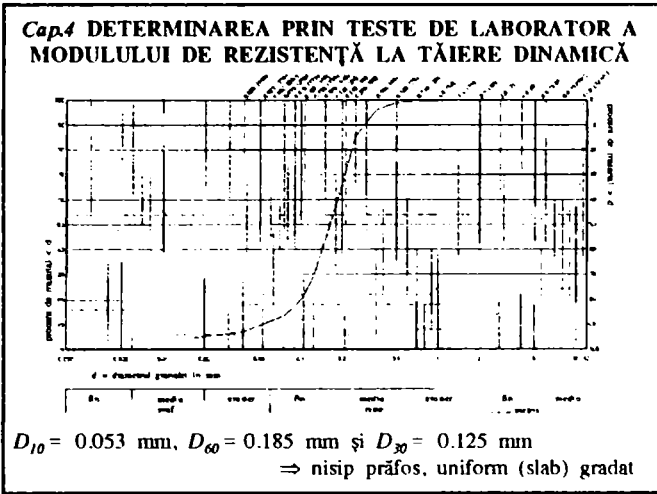
metoda în laborator sau de teren

⇒ viteza v_s de propagare a undelor tăietoare ⇒ $G_0 = \rho v_s^2$

factori considerați → expresii (procedee) empirice

modelul empiric Wu et al. (1984):

- materiale granulare fine necoezive
- gradul de saturare
- presiunea efectivă



Cap.4 DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ LA TĂIERE DINAMICĂ

**desfășurarea testelor de vibrare prin torsiune liberă
 pregătirea epruvetelor**

$\rightarrow D_c = 90 \% (\rho_d = 1.65 \text{ gr/cm}^3)$
 $D_c = 84 \% (\rho_d = 1.65 \text{ gr/cm}^3)$
 $\rightarrow w = 0, 4, 6, 8, 12 \%$

Cap.4 DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ LA TĂIERE DINAMICĂ

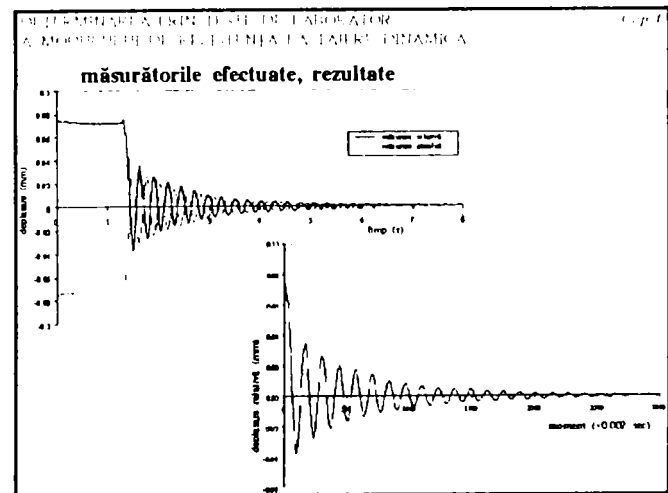
presiunea efectivă 46 kN/m^2

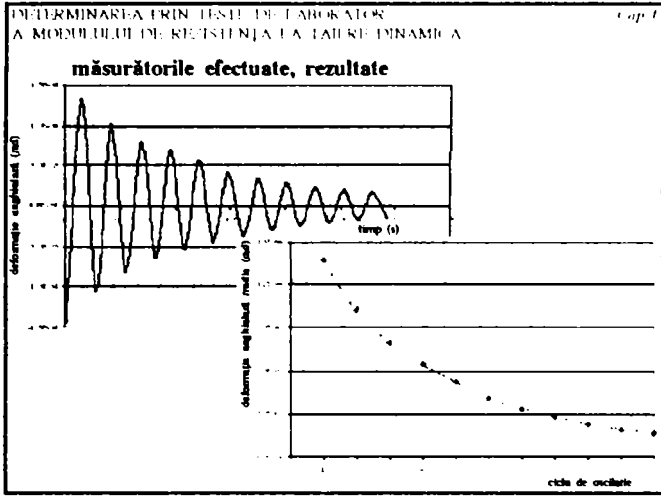
	m_d (gr)	ρ_d (gr/cm ³)	D_c (%)	n (%)	D_r (%)
den. ridicată	832.2	1.644	89.9	37.9	58.8
den. redusă	763.5	1.524	83.3	42.5	27.1

Cap.4 DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ LA TĂIERE DINAMICĂ

efectuarea testelor VTL

frecvența de oscilație $\rightarrow m_{od} = 0, 2 \times 5, 2 \times 10 \text{ kg} \Rightarrow 30 \text{ teste}$



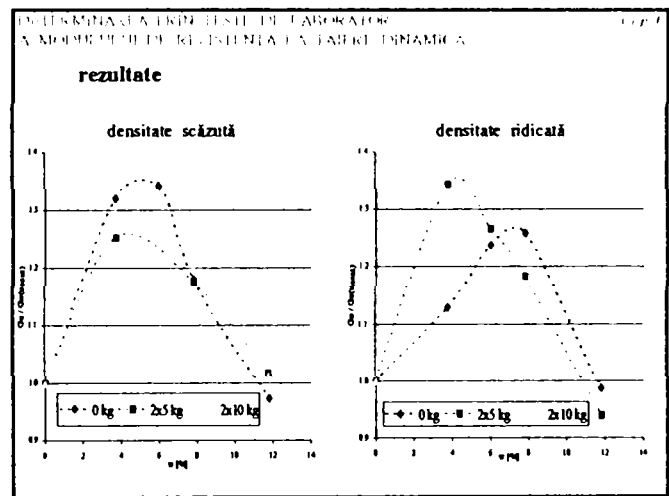
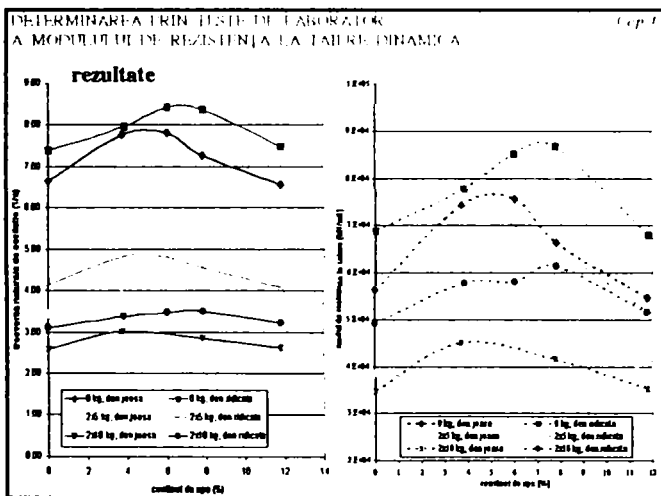


DETERMINAREA PRIN TESTE DE LABORATOR A MODULULUI DE REZISTENȚĂ LA TĂIERE DINAMICĂ Cap. 4

rezultate

- ⇒ perioada T,
- deformația unghiulară specifică γ ,
- raportul de vâscozitate D,
- frecvența naturală de oscilație f_n ,
- viteza undelor tăietoare v_s ,

⇒ $G_o = \rho v_s^2$



Cap.5 STABILIREA CORELAȚIEI ANALITICE DINTRE PARAMETRUL CCC ȘI CONȚINUTUL DE APĂ AL NISIPULUI

Sistem cu un grad de libertate cinematică

$$Z = \frac{F_o}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2D \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad W = \int_0^T (c\dot{z} + kz)\dot{z}dt = \frac{c}{k} F_o Z \omega \pi$$

Sistem cu două grade de libertate cinematică

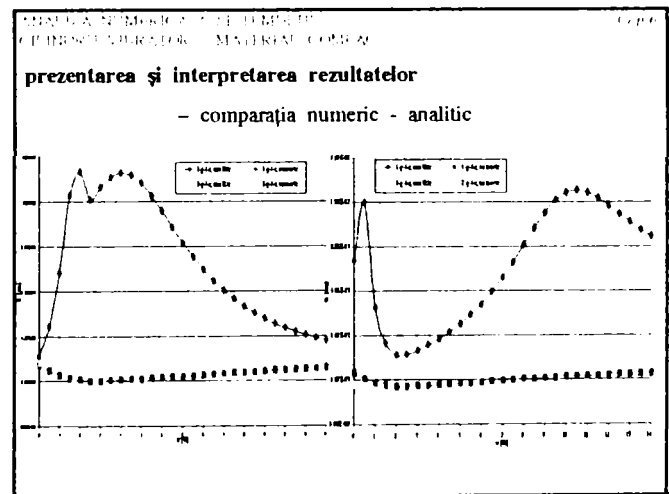
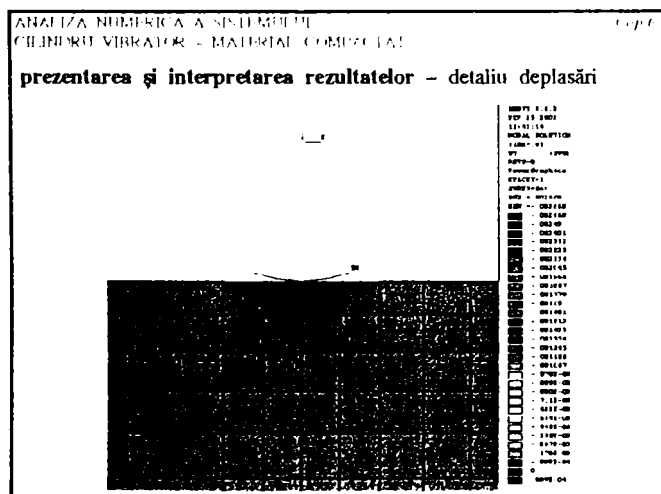
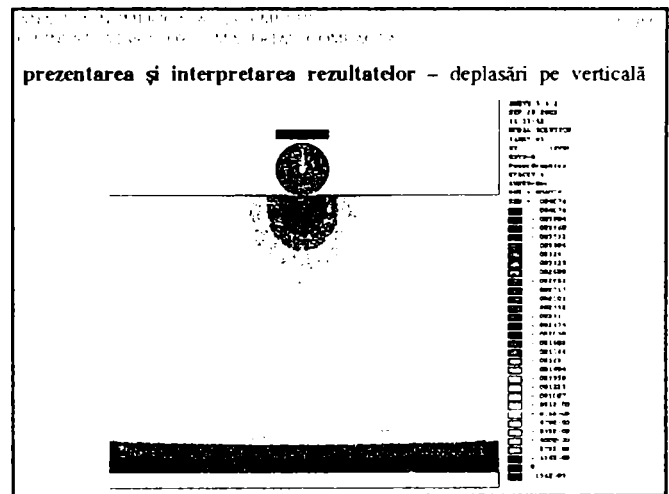
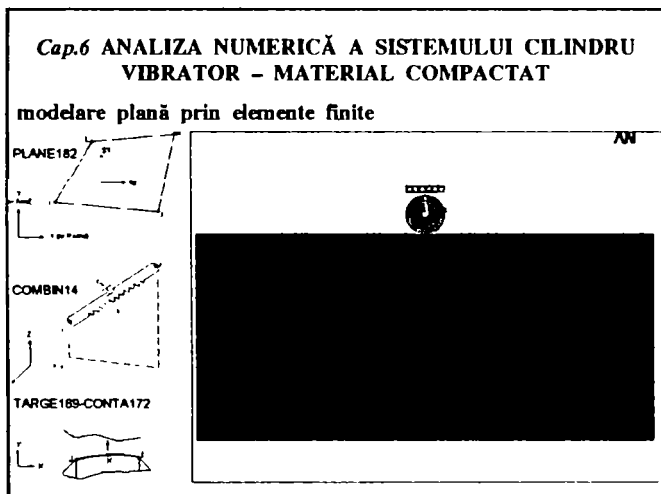
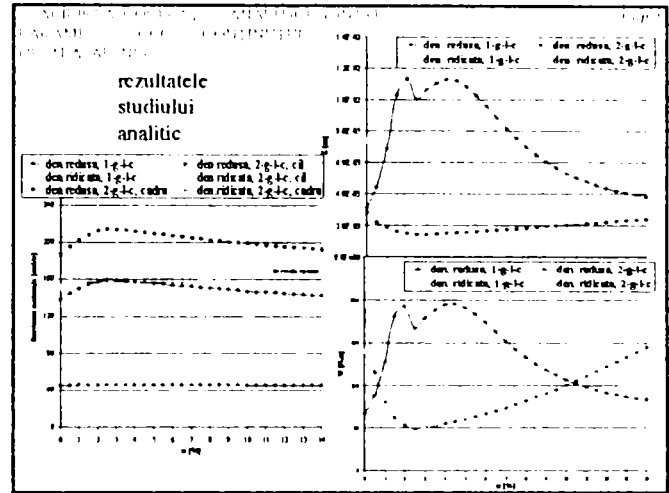
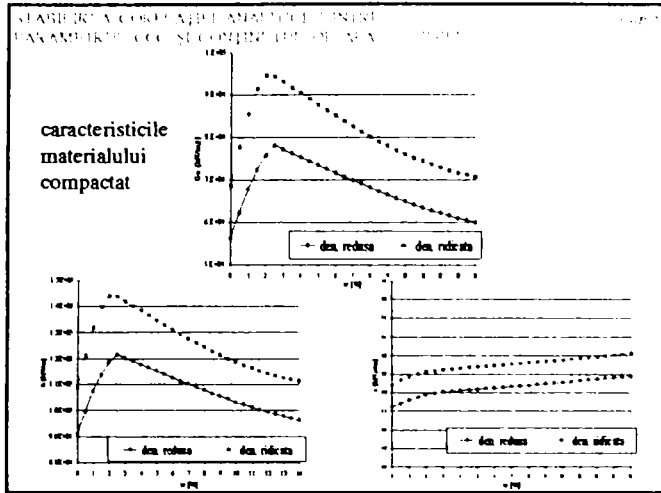
$$Z_s = \sqrt{U_s^2 + V_s^2} \quad W = \int_0^T (c\dot{z} + kz)\dot{z}dt = c\omega\pi Z_s^2$$

în care $k = \frac{G}{1-\nu} (3.1a^{0.75} b^{0.25} + 1.6b) \quad c = 4ab \sqrt{2G(1+\nu)\rho_s \frac{1-\nu}{1-2\nu}}$

STABILIREA CORELAȚIEI ANALITICE DINTRE PARAMETRUL CCC ȘI CONȚINUTUL DE APĂ AL NISIPULUI Cap. 5

determinarea răspunsului unui sistem material compactat – cilindru vibrator

- utilaj CH-43
- $m_r = 4760\text{kg}$, $2r = 1.2\text{m}$, $2a = 1.6\text{m}$, $f = 25\text{Hz}$, $F_o = 85\text{kN}$
- densitatea în stare uscată ρ_s
1524kg/m³ și 1644kg/m³
- conținut de apă w
de la 0 la 14%
- modul de rezistență pt. starea uscată $G_{o(wcat)}$
56200 kN/m² și 68800 kN/m² (conf. testelor de lab.)
- variația $G_s(w)$
modelul Wu.et.al.(1984)



CONCLUZII

- este recunoscută influența conținutului de apă în procesul de compactare, dar nu sunt disponibile destule informații specifice;
- câteva modele empirice pt. determinarea caracteristicilor dinamice ale nisipurilor, dar fiecare model consideră doar unii dintre parametri implicați;
- sistemul Controlului Continuu al Compactării este din ce în ce mai des utilizat și în paralel studiat;
- testele de Vibrare prin Torsiune Liberă asupra epruvetelor de nisip fin, demonstrează influența importantă a parametrilor considerați;
- răspunsul determinat analitic demonstrează efectul conținutului de apă asupra deplasării pe verticală a cilindrului, și deci asupra energiei absorbite de material (parametrul CCC Terameter).

RECOMANDĂRI

- consultarea continuă a literaturii de specialitate, a lucrărilor și rapoartelor întocmite de constructori și producătorii de utilaje;
- efectuarea unui număr mai mare de teste pentru determinarea caracteristicilor dinamice ale pământurilor de diverse tipuri, cu diferite valori ale parametrilor implicați; omogenitatea epruvetelor;
- dezvoltarea analitică pentru sistemul material compactat – cilindru vibrator prin considerarea diferitelor faze de operare, respectiv a comportării plastice;
- perfecționarea studiului în elemente finite în ceea ce privește modelarea încărcării dinamice sinusoidale și modelarea comportării elasto-plastice a materialului compactat;
- compararea și corelarea rezultatelor dezvoltărilor analitice și numerice cu rezultate ale unor teste in-situ efectuate pentru diverse utilaje ce lucrează în diferite condiții de pământuri granulare.