

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**  
**Școala doctorală de inginerie**



# **REZUMAT**

**ANALIZA PARAMETRICĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE DINAMICĂ  
PRIN VIBRAȚII CU IMPACT ASUPRA PERFORMANȚELOR BETONULUI  
PROASPĂT LA PUNEREA ÎN OPERĂ**

**Doctorand,**  
**Ing. Zarioiu (Pințoi) Maria Ramona**

**Conducător Științific**

**Prof. dr. ing. dr. h. c. Polidor-Paul BRATU**  
**Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România**

**Referenți științifici**

**Prof.dr.ing. Alexandru VLĂDEANU**  
**Cercet. Șt. Gr. I. dr. Veturia CHIROIU**  
**Conf. dr. ing. Silviu-Marian NĂSTAC**

**Seria I6 Inginerie Mecanică Nr. 29**  
**GALAȚI**  
**2015**

Seriile tezelor de doctorat sustinute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul **ȘTIINȚE INGINEREȘTI**

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

**Seria I 6: Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8. **Ingineria sistemelor**

Domeniul **ȘTIINȚE ECONOMICE**

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul **ȘTIINȚE UMANISTE**

Seria U 1: **Filologie-Engleză**

Seria U 2: **Filologie-Română**

Seria U 3: **Istorie**

**ROMÂNIA**  
**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE**  
**UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**



**DECIZIA**

nr. 1276 / 17.07.2015

În conformitate cu prevederile Legii Educației Naționale nr. 1/05.01.2011, ale Codului studiilor universitare de doctorat și ale Regulamentului instituțional privind organizarea și funcționarea studiilor universitare de doctorat în școlile doctorale din Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați;  
în baza referatului conducătorului științific **Prof.dr.ing. Polidor-Paul BRATU**;  
conform aprobării Consiliului Școlii doctorale de Inginerie din data de **17.07.2015**;  
în baza Ordinului Ministrului Educației, Cercetării, Tineretului și Sportului nr. 3288/20.02.2012 privitor la numirea rectorului;

**Rectorul universității decide:**

**Art. 1.** Se numește comisia pentru evaluarea și susținerea publică a tezei de doctorat de către doctorandul(a) **ing. ZARIOIU I. MARIA-RAMONA (PINȚOI)**, domeniul **Inginerie mecanică**, în următoarea componență :

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>1. Președinte</b>             | <b>Conf.dr.ing. Cristian-Silviu SIMIONESCU</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați   |
| <b>2. Conducător de doctorat</b> | <b>Prof.dr.ing. Polidor-Paul BRATU</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România |
| <b>3. Referent oficial</b>       | <b>Prof.dr.ing. Alexandru VLĂDEANU</b><br>Universitatea Tehnică de Construcții din București  |
| <b>4. Referent oficial</b>       | <b>Cercet.șt.gr.I dr. Veturia CHIROIU</b><br>Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române   |
| <b>5. Referent oficial</b>       | <b>Conf.dr.ing. Silviu-Marian NĂSTAC</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați   |

**Art. 2.** Școala doctorală de Inginerie, Secretariatul doctorat, Compartimentul salarizare și Biroul financiar vor duce la îndeplinire prevederile prezentei decizii.

**RECTOR**  
Prof. dr. ing. **Julian Gabriel BÎRSAN**





	<b>Nr. Pag.</b>
<b>CUPRINS</b>	<b>1/1</b>
<b>CUVANT INAINTE</b>	<b>-/5</b>
<b>INTRODUCERE</b>	<b>3/7</b>
<b>SIMBOL</b>	<b>-/11</b>
<b>LISTA FIGURI</b>	<b>-/13</b>
<b>LISTA TABELE</b>	<b>-/14</b>
<b>Cap. I. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PENTRU PREPARAREA BETONULUI PROASPĂT ÎN CONCORDANȚĂ CU MODELELE REOLOGICE SPECIFICE</b>	<b>4/15</b>
<b>I.1. Caracteristicile reologice ale betonului</b>	<b>4/15</b>
<b>I.2. Structura și componentele betonului proaspăt</b>	<b>4/17</b>
<b>I.2.1. Agregate pentru beton</b>	<b>4/17</b>
<b>I.2.2. Ciment</b>	<b>4/19</b>
<b>I.2.3. Apa de amestec</b>	<b>5/19</b>
<b>I.2.4. Aditivi</b>	<b>5/19</b>
<b>I.2.5. Adaosuri</b>	<b>5/20</b>
<b>I.2.6. Caracteristicile betonului proaspăt. Factorii de influență</b>	<b>5/20</b>
<b>Cap. II. PROCESE MACROSCOPICE ȘI MICROSCOPICE ALE BETONULUI LA COMPACTAREA DINAMICĂ PRIN VIBRARE</b>	<b>6/25</b>
<b>II.1. Răspunsul dinamic în regim microscopic al betonului proaspăt</b>	<b>6/25</b>
<b>II.1.1. Tensiunea tangențială</b>	<b>6/27</b>
<b>II.1.2. Modulul de rigiditate</b>	<b>6/28</b>
<b>II.1.3. Vâscozitatea dinamică</b>	<b>6/29</b>
<b>II.1.4. Vâscozitatea aparentă</b>	<b>6/31</b>
<b>II.1.5. Disipare internă prin frecare</b>	<b>7/32</b>
<b>II.2. Modele reologice vâsco-elasto-plastice ale betonului proaspăt în procesul de vibrare</b>	<b>7/33</b>
<b>II.2.1. Modele reologice simple</b>	<b>7/33</b>
<b>II.2.2. Modele reologice compuse</b>	<b>7/34</b>
<b>Cap. III. ANALIZA DINAMICĂ A COMPORTĂRII BETONULUI PROASPĂT ÎN TIMPUL PROCESULUI DE VIBRARE</b>	<b>8/37</b>
<b>III.1. Studiul mișcării sistemului masă vibrantă-beton</b>	<b>8/37</b>
<b>III.2. Caracterizarea regimului de vibrații</b>	<b>10/43</b>
<b>III.3. Caracterizarea procesului ondulatoriu</b>	<b>10/44</b>
<b>III.3.1. Ecuația diferențială tridimensională</b>	<b>10/44</b>
<b>III.3.2 Ecuația unidimensională a undei plane</b>	<b>11/47</b>
<b>III.3.3 Ecuația undei cilindrice</b>	<b>12/49</b>
<b>III.3.4. Ecuația undei sferice</b>	<b>12/50</b>
<b>III.3.5. Ecuația de propagare cu disipare</b>	<b>13/51</b>
<b>III.4. Caracterizarea procesului de compactare prin vibrare</b>	<b>13/52</b>
<b>III.4.1. Influența factorilor reologici în procesul de compactare prin vibrarea betonului</b>	<b>14/56</b>
<b>III.4.2. Influența vibrațiilor asupra compactării betonului</b>	<b>16/62</b>

<b>Cap. IV. METODE ENERGETICE DE ANALIZĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN VIBRARE A BETONULUI PROASPĂT</b>	<b>16/69</b>
IV.1. Transmiterea energiei în procesul de compactare	16/69
IV.2. Modelarea macroscopică a comportării globale beton-suport vibrator	17/72
IV.2.1. Estimarea rezistenței betonului	17/73
IV.2.2. Ecuații diferențiale ale sistemului vibrator beton	17/75
<b>Cap V. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC AL BETONULUI PROASPĂT ÎN PROCESUL DE COMPACTARE</b>	<b>18/77</b>
V.1. Materiale componente	18/77
V.2. Metode de încercare pentru verificarea calității betonului	19/78
V.3. Încercări necesare pentru verificarea calității agregatelor minerale (agregate naturale și/sau concasate)	19/79
V.4. Încercări necesare pentru verificarea calității cimentului	19/83
V.5. Determinarea duratei optime de vibrație de compactare dinamică	19/83
V.6. Determinarea duratei optime de malaxare în corelație cu durata optimă de vibrație	22/86
<b>Cap. VI. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	<b>28/93</b>
IV.1. Contribuții personale	29/94
IV.2. Direcții viitoare de cercetare	29/94
<b>ANEXE</b>	<b>-/97</b>
Bibliografie	31/125
Lista lucrări	-/131

## INTRODUCERE

Teza tratează problema compactării betonului ca urmare a efectului transmiterii energiei de la sursă la mediu, fiind puse în evidență două caracteristici fundamentale ale sistemului: modelul dinamic cu disipare vâscoasă și gradul de compactare, implicit densitatea de energie în mediul de compactare. Rezultatele obținute din analizele pe modele reologice utilizate sunt confirmate prin experimentările pe beton care pun în evidență transmiterea energiei pentru compactarea betonului prin efectul de undă generată în masa betonului ca urmare a vibrațiilor de excitație întreținute.

În consecință, se abordează problematica măririi gradului de performanță a elementelor din beton realizate în procesul de compactarea prin vibrare a betonului proaspăt pus în operă. Pe baza creării modelelor dinamice cu elemente vâscoase și elastice vor fi stabilite regimuri optime ale vibrării tehnologice astfel încât microstructura betonului să poată fi caracterizată printr-o distribuție adecvată a câmpului cu porozități controlabile în scopul creșterii rezistenței betonului după întărire la valori superioare soluțiilor actuale.

De asemenea, se studiază și analizează sistemul de reglare a parametrilor regimului de vibrații astfel încât gradul de transmisibilitate a acțiunii să fie maxim reprezentat prin elipsa histerezică de disipare internă, precum și prin parametrii reologici de răspuns (rigiditatea și amortizarea) betonului proaspăt care trebuie să se mențină în limite optime.

Evidențierea stării energetice a sistemului poate fi realizată prin intermediul presiunii, a vitezei de propagare a undelor, a parametrilor vibrațiilor cât și a energiei disipative.

Prin studiile și cercetările efectuate, lucrarea de față oferă o serie de instrumente de calcul și recomandări practice necesare în activitatea de producție a elementelor turnate in situ și a elementelor prefabricate din beton.

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole care prezintă în detaliu tema abordată și rezolvarea ei progresivă, precum și concluziile, contribuțiile originale și respectiv modul de valorificare a rezultatelor și direcțiile viitoare de cercetare.

**Capitolul I** intitulat „Stadiul actual al cercetărilor pentru prepararea betonului proaspăt în concordanță cu modelele reologice” prezintă cercetările din domeniu efectuate pentru prepararea betonului proaspăt. De asemenea sunt prezentate principalele caracteristici reologice, structura-compoziția și caracteristicile betonului.

**Capitolul II** intitulat „procesele macroscopice și microscopice ale betonului la compactarea dinamică prin vibrare” prezintă răspunsul dinamic al betonului proaspăt prin aplicarea dinamică a sarcinii, respectiv regimul de vibrații, determină modificări în structura betonului proaspăt, precum și ale caracteristicilor sale reologice. Sunt evidențiate modelele reologice vâsco-elasto-plastice ale betonului proaspăt în procesul de vibrare.

**Capitolul III** intitulat „analiza dinamică a comportării betonului proaspăt în timpul procesului de vibrare” prezintă optimizarea compactării betonului proaspăt realizată printr-o corelație eficientă a caracteristicilor fizico-mecanici cu parametrii de vibrare (amplitudine, frecvență). Se caracterizează regimul de vibrații și a procesului ondulatoriu, cât și a procesului de compactare prin vibrare.

**Capitolul IV** intitulat „metode energetice de analiză a procesului de compactare prin vibrare a betonului proaspăt” prezintă transmiterea energiei în procesul de compactare cât și modelarea macroscopică a comportării globale beton suport vibrator.

**Capitolul V** intitulat „determinări experimentale pentru evaluarea răspunsului dinamic al betonului proaspăt în procesul de compactare” înglobează partea de determinări experimentale pentru evaluarea răspunsului dinamic al betonului proaspăt în procesul de compactare ținând seama de cele două procese și anume malaxarea și vibrarea.

**Capitolul VI** intitulat „Concluzii. Contribuții originale” asamblează concluziile care se pot formula cu privire la cercetările efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat și contribuțiile personale ale autorului, referitor la beton prezentate și analizate teoretic și experimental din punct de vedere constructiv și funcțional în vederea aplicării cu succes în practică.

## **Cap. I. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PENTRU PREPARAREA BETONULUI PROASPĂT ÎN CONCORDANȚĂ CU MODELELE REOLOGICE SPECIFICE**

### **I.1. Caracteristicile reologice ale betonului**

Betonul este un material artificial, conglomerat, obținut prin întărirea unui amestec de agregate, ciment și apă. Compoziția sa determină, prin proporția constituenților, prin modul de preparare și punere în operă, structura finală și proprietățile fizico-mecanice în stare întărită.

Structura betonului este dispersie de materiale granulare înglobate într-o masă omogenă formată prin întărirea amestecului de agregate, ciment și apă. Amestecarea componentelor dozate și omogenizate asigură formarea betonului proaspăt, iar în final se obține betonul întărit ca urmare a reacțiilor fizico-chimice de hidratare, hidroliză și cristalizare.

Constituenții betonului sunt agregatele, cimentul, aditivii și apa. Ca și betonul întărit, betonul proaspăt se prezintă ca o dispersie de materiale granulare (constituenți macrostructurali) într-o matrice de pastă de ciment (constituenți microstructurali) și bule de aer localizate în porii materialului.

Proprietățile reologice ale betonului proaspăt sunt determinate în esență, de proprietățile pastei de ciment, de partea fină din agregat (agregatul cu granulație mare influențează prin efect de masă). Apropierea de comportarea fluidelor Bingham este determinată de existența unor forțe de interacțiune ce se manifestă între particulele solide, forțe ce determină apariția unei vâscozități plastice (structurale) și unei limite de curgere.

Calitatea betonului proaspăt se apreciază prin determinarea lucrabilității, densității aparente, a conținutului de apă și a granulozității agregatelor continute în beton. Pentru unele betoane este necesar să se determine și cantitatea de aer oclus.

### **I.2. Structura și componentele betonului proaspăt**

Materialele componenete nu trebuie să conțină substanțe nocive în cantități care pot avea un efect dăunător asupra durabilității betonului sau provoacă coroziunea armăturilor, ele trebuie să fie apte pentru utilizarea preconizată a betonului.

Conform SR EN 206-1 pentru betoane trebuie să se utilizeze numai materiale componente cu aptitudinea de utilizare stabilită pentru cerințele specifice.

#### **I.2.1. Agregate pentru beton**

Agregatele naturale pot fi de balastieră și/sau carieră, sortate și/sau concasate. Acestea trebuie să respecte standardul de produs SR EN 12620+A1 și să aibă anumite caracteristici impuse de normele în vigoare de preparare a betonului CP 012-1 și NE 012-02.

#### **I.2.2. Ciment**

Cerințele de bază pentru utilizarea cimenturilor la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu cerințele impuse de CP 012-1, dar care trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conform cu SR EN 197-1.



### **I.2.3. Apa de amestec**

Cerințele de bază pentru utilizarea apei la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu cerințele impuse de CP 012-1 și care arată că aptitudinea generală de utilizare este stabilită pentru apa de amestec și apele de spălare recuperate de la producția betonului, conform SR EN 1008.

### **I.2.4. Aditivi**

Cerințele de bază pentru utilizarea aditivilor la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu CP 012-1. Aditivi utilizați trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conform SR EN 934-2+A1.

### **I.2.5. Adaosuri**

Aptitudinea generală de utilizare a adaosurilor minerale pulverlente (filere minerale și pigmenti) este în conformitate cu CP 012-1. Adaosurile utilizați trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conform SR EN 450-1, SR EN 450-2, SR EN 13263-1+A1 și SR EN 13263-2+A1.

### **I.2.6. Caracteristicile betonului proaspăt. Factorii de influență**

Compoziția betonului și materialele componente cu proprietăți specifice sau cu compoziție prescrisă, trebuie să fie alese, astfel încât, să satisfacă cerințele specificate pentru betonul proaspăt și întărit, inclusiv consistența, masa volumică, rezistența, durabilitatea și protecția la coroziune a pieselor din oțel beton înglobate. Se ține seama de procedeele de producție și metoda prin care se intenționează să se execute lucrările de beton.

Betonul în stare proaspătă are următoarele caracteristici fizico-mecanice specifice, dintre care mai importante sunt următoarele:

- greutatea volumică;
- coeziunea;
- consistența;
- lucrabilitatea;
- gradul de compactare.

Betonul proaspăt trebuie să aibă două caracteristici esențiale, astfel:

- tendința de segregare neglijabilă pentru a evita pericolul dezvoltării segregării în elementele constituente ce s-ar putea naște în timpul transportului;
- plasticitatea corespunzătoare pentru a se putea pune în operă, adică pentru a umple tiparele și a îngloba armăturile. Aceste două calități pot fi îmbunătățite prin creșterea raportului A/C, creșterea elementelor fine din amestec și scăderea dimensiunii maxime a agregatului. Se constată, însă, că aceste măsuri duc la o diminuare a rezistenței mecanice a betonului întărit. Rezultă că în vederea obținerii unui beton de calitate superioară trebuie aleasă o soluție de compromis care să asigure și o calitate corespunzătoare betonului proaspăt, dar în același timp să conducă și la obținerea unor rezistențe mecanice superioare.

## Cap. II. PROCESE MACROSCOPE ȘI MICROSCOPE ALE BETONULUI LA COMPACTAREA DINAMICĂ PRIN VIBRARE

### II.1. Răspunsul dinamic în regim microscopic al betonului proaspăt

Dinamica vibrării pentru compactarea betonului a fost abordată de mai mulți autori, fiecare dintre ei urmărind realizarea unui model matematic care să corespundă cât mai exact sistemului real.

#### II.1.1. Tensiunea tangențială

Variația efortului tangențial în beton sub acțiunea unei încărcări statice este prezentată de V.V. Stalnikov în lucrarea "Investigations of elastoplastoviscous properties of cement water pastes". Lucrând după metoda Rebinder și aplicând o tensiune relativă mică s-a obținut diagrama din fig II.1.4. ea echivalează din punct de vedere reologic cu un model Kelvin (KE). Curba se apropie mult de modelul reologic cunoscut al betonului (conform Neville [81])

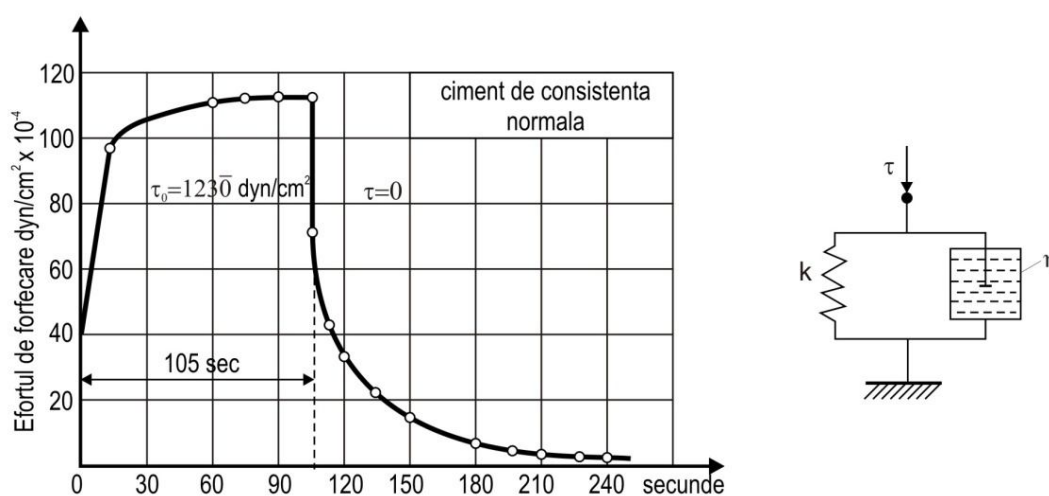


Fig. II.1.4 Variația efortului tangențial în beton, funcție de timp

#### II.1.2. Modulul de rigiditate

Caracteristica reologică a unui solid plastic vâsco-dilatant care indică creșterea caracteristică a efortului cerut pentru o creștere unitară a deformației este definită ca "modulul de rigiditate".

Interfața particulelor, numită și agregare de unii autori, este funcție atât de compoziția betonului, cât și de dimensiunile spațiului folosit (disponibil).

#### II.1.3. Vâscozitatea dinamică

Pentru studiu vâscozității dinamice T.C. Powers [93] a utilizat un vâscometru înregistrator format dintr-un container cilindric, rotitor, în care se introduce un tambur fix.

#### II.1.4. Vâscozitatea aparentă

O încercare de a stabili vâscozitatea aparentă a betonului fluidificat sub efectul vibrațiilor, a fost realizată R.L. Hermite și G Tournon [50]. Pentru aceasta, containerul cu beton a fost fixat pe o masă vibrantă, iar o sferă de metal cu diametru mai mare decât al particulelor, aflată în container, a fost trasă afară cu forță constantă.

### II.1.5. Disipare internă prin frecare

Frecarea coulombiană este caracterizată de expresia:

$$\tau_r = \tau_0 + P \operatorname{tg} \phi \quad (\text{II.1.21})$$

unde  $P$  – apăsarea normală;

$\tau_0$  – efortul tangențial la  $P=0$ .

Experimental, R. L'Hermite [52] a determinat variația frecării interne funcție de apăsarea normală, comparând valoarea unghiului de frecare internă  $\phi_1$ , cu valoarea lui în cazul alunecării  $\phi_2$ . Pentru beton aceste valori sunt apropiate (fig. II.1.12).

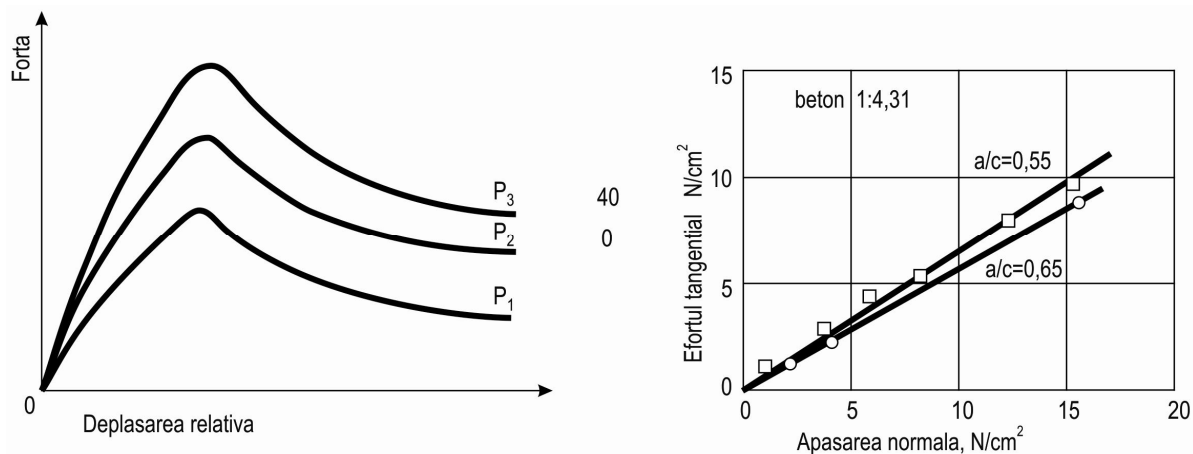


Fig. II.1.12 Variația unghiului de frecare la beton

## II.2. Modele reologice vâsco-elasto-plastice ale betonului proaspăt în procesul de vibrație

Comportarea betonului proaspăt sub sarcină se prezintă ca o problemă dificilă având în vedere numărul factorilor care influențează caracteristicilor acestuia.

Proprietățile reologice ale betonului trebuie completate printr-o măsurare a gradului de omogenitate al acestuia

### II.2.1. Modele reologice simple

Unul dintre primele modele reologice utilizate pentru beton a fost modelul Ross. Acesta ilustrează comportarea în timp a betonului, dar are o serie de dezavantaje printre care și faptul că nu redă corect fenomenul de relaxare.

Un alt model simplu care descrie comportarea reologică a betonului este modelul Kelvin-Hooke serie.

Modelele Burgers și Fluge sunt concepute pentru a descrie fluajul stabil și sestabil al betonului, respectiv curgerea lentă sub sarcină.

### II.2.2. Modele reologice compuse

Modelele compuse, cuprinzând o sumă de modele simple și care se pretează mai bine în a descrie încărcarea sunt cele realizate de Neville, Cowan și Freudental. Prin elementele elastice Hooke acestea descriu încărcarea rapidă în timp ce elementele de tip Kelvin, Burgers, Newton, descriu încărcarea lentă. Un astfel de model, dintre cele mai complexe, este modelul Toroja Paez.

Un model care descrie și curgerea plastică este modelul Stolnikov. Acesta inserează un element Kelvin cu un corp Maxwell Schwedow ce prezintă și deformare plastică.

Un model compus este modelul Utîtki, care ține cont de deformările elastice și plastice ale constituenților betonului.

**Cap. III. ANALIZA DINAMICĂ A COMPORTĂRII BETONULUI PROASPĂT ÎN TIMPUL PROCESULUI DE VIBRARE**

**III.1. Studiul mișcării sistemului masă vibrantă-beton**

Optimizarea compactării betonului proaspăt poate fi realizată printr-o corelație eficientă a caracteristicilor fizico-mecanice cu parametrii de vibrație (amplitudine, frecvență). Astfel, concordanța parametrilor de vibrație cu vâscozitatea necesară, care determină disiparea internă de energie, trebuie să asigure valorile coeficientul de amortizare vâscoasă pentru betonul proaspăt pus în operă și supus unui regim de vibrație adecvat.

Ca urmare, au fost stabilite relațiile de coerență între amplitudinea  $A_1$  a suportului vibrator excitat cu forța  $F(t) = m_0 r \omega^2 \sin \omega t$  unde  $F_0 = m_0 r \omega^2$  este amplitudinea forței și masa  $m$  a betonului proaspăt din tipar.

Modelul dinamic este prezentat în figura III.1.1 și se caracterizează prin faptul că între masa betonului și platforma vibratoare legătura adoptată este de tip vâsco-liniar cu coeficientul  $c$ , adică forța vâscoasă de legătură este de forma  $Q(t) = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$ .

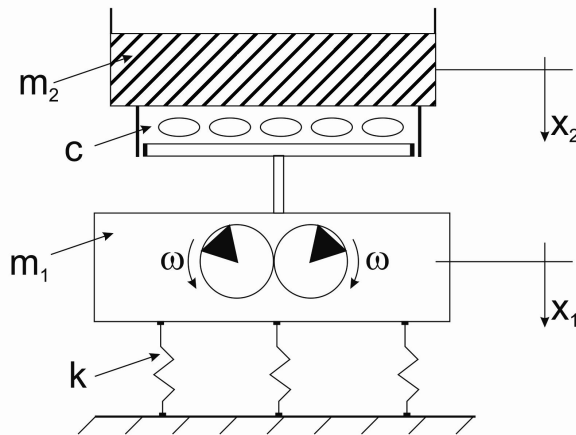


Fig. III.1.1. Model dinamic

În figura III.1.1, platforma vibratoare de masă  $m_1$ , cu deplasarea instantanee  $x_1=x_1(t)$  este excitată de un vibrator inerțial cu două mase excentrice cu momentul static  $m_0 r$  și cu viteza unghiulară  $\omega$ .

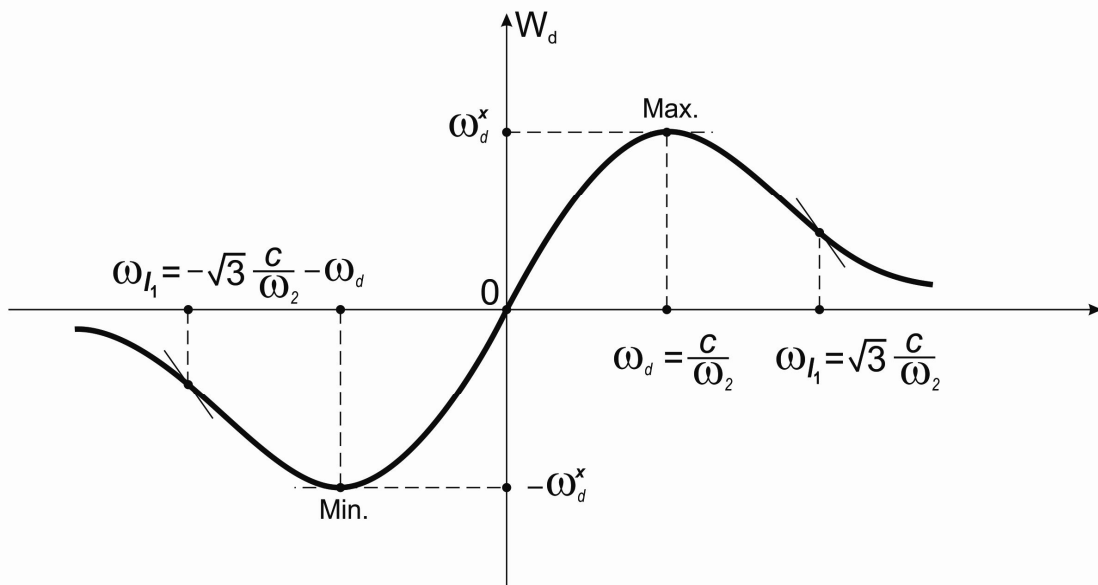


Fig. III.1.2. Curba  $W_d-\omega$

În figura III.1.3 sunt prezentate curbele de energie disipativă pentru trei variante distincte ale lui  $c$  și pulsație  $\omega=314$  rad/s.

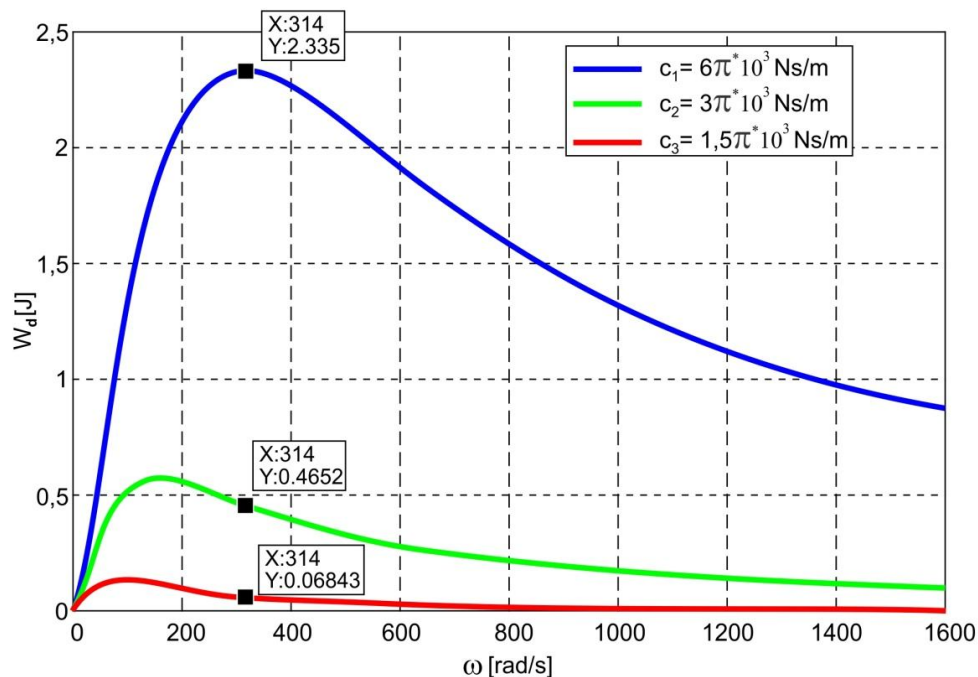


Fig. III.1.3. Curbele de energie disipativă

Astfel, în figura III.1.4 se prezintă curbele histerezis sub forma de elipse pentru trei valori distincte ale lui  $c$  și pulsație  $\omega=314$  rad/s.

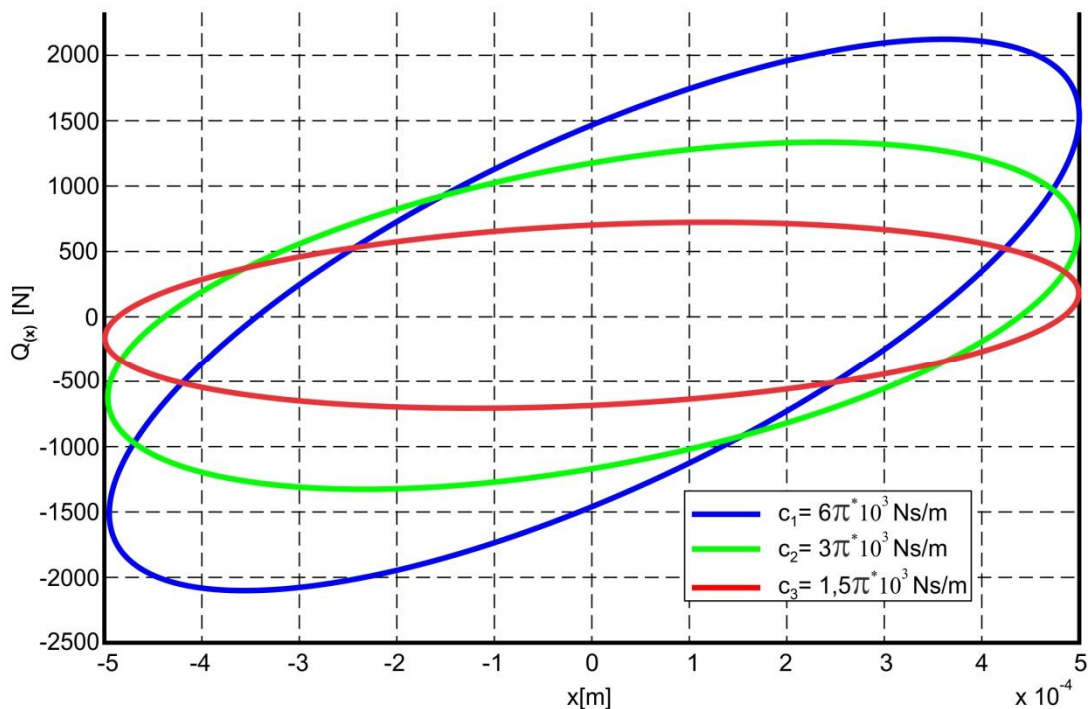


Fig. III.1.4. Curbe histerezis sub formă de elipse

Se remarcă faptul că aria elipsei, a buclei histerezis, reprezintă energia disipată ca fiind un indicator cert și semnificativ pentru gradul de compactare a betonului proaspăt vibrat.

Pe baza schematizării modelului vâsco-liniar de compactare a betonului proaspăt în regim de vibrație pot fi determinate următoarele caracteristici:

- legea de variație a energiei disipate în regim staționar de vibrații pentru procesul de compactare;
- valoarea maximă a energiei disipate prin corelația pulsației de excitație cu masa de beton și constanta vâscoasă de disipare a energiei;
- ridicarea buclelor histerezice în funcție de parametrii de vibrație  $A_1$ ,  $\omega$  și de masa  $m_2$  și constanta de amortizare  $c$  a betonului proaspăt.

### III.2. Caracterizarea regimului de vibrații

Propagarea vibrațiilor în beton

Din studiul dinamicii sistemului vibrator beton rezultă că betonul supus vibrațiilor suferă modificări importante trecând din fază solidă în aceea de fluid vâscos, energia transmisă prin vibrații ridicând energia internă și mobilitatea agregatelor betonului.

### III.3. Caracterizarea procesului ondulatoriu

Procesul ondulatoriu se caracterizează prin ecuațiile diferențiale ale undelor.

#### III.3.1. Ecuația diferențială tridimensională

Considerând perturbarea mediului ca un proces adiabatic ce se efectuează fără schimb de căldură cu exteriorul se poate scrie:

$$pV^\kappa = ct$$

(III.3.1)

unde  $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ , iar  $C_p$ ,  $C_v$  reprezintă căldura specifică la presiune constantă respectiv volum constant.

Logaritmînd și derivînd relația (III.3.1) se obține:

$$\frac{dp'}{p'} = -\kappa \frac{dV}{V}$$

și dacă  $p' = p_0 + p$  și ținînd seama de (III.2.8) și că  $p \ll p_0$ , relația devine:

$$\frac{p}{p_0} = \kappa S = \kappa = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

(III.3.2)

sau:

(III.3.3)

$$p = \frac{\kappa p_0}{\rho_0} (\rho' - \rho_0)$$

Notînd

(III.3.4)

$$c^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0}$$

care este o valoare constantă reprezentînd tocmai viteza de propagare a undei în beton, relația (III.3.3) devine după derivare:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t}$$

(III.3.5)

Conform legii fundamentale a dinamicii lui Newton, luînd în considerare forțele ce acționează pe elementul de volum (fig. III.3.1) după axa Ox.

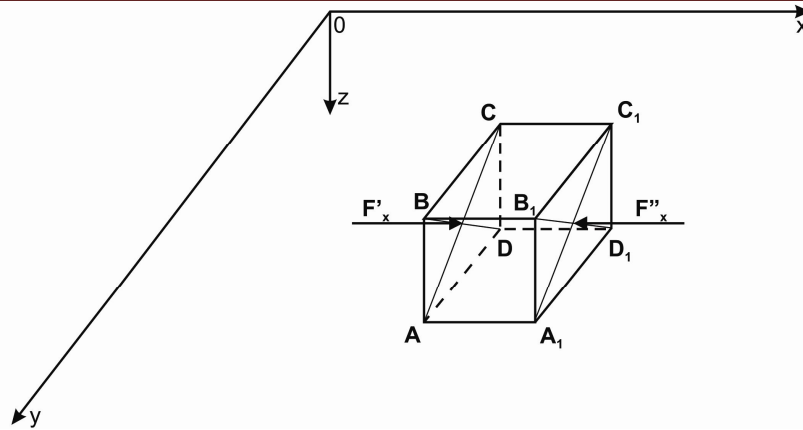


Fig. III.3.1. Schema forțelor pe elementul de volum

### III.3.2 Ecuația unidimensională a undei plane

Considerînd propagarea undei pe o singură direcție  $v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$  și  $v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$  și

$\phi = \phi(x, t)$ , relația (III.3.26) devine:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (\text{III.3.27})$$

Pentru integrarea ecuației diferențiale (III.3.27) se introduce variabilele independente  $\alpha$  și  $\beta$  astfel:

$$\alpha = ct + x$$

$$\beta = ct - x$$

iar

$$\phi = \phi(\alpha, \beta)$$

$$(\text{III.3.28})$$

deci:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial x}$$

$$(\text{III.3.29})$$

dar:  $\frac{\partial \alpha}{\partial x} = 1$  și  $\frac{\partial \beta}{\partial x} = -1$ , încât (III.3.29) devine:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} - \frac{\partial \phi}{\partial \beta}$$

$$(\text{III.3.30})$$

Pentru o perturbație sinusoidală funcția  $\phi$  are aceeași valoare la  $t$  și  $t+T$ , unde  $T = \frac{\lambda}{c}$  iar  $\lambda$ , lungimea de undă, reprezintă distanța în direcția de propagare între două puncte succesive în care ajunge frontul de undă într-o perioadă.

Soluția ecuației unidimensionale a undei plane pentru perturbația sinusoidală este:

$$\phi = \mathcal{A}e^{ik(ct-x)} + \mathcal{B}e^{ik(ct+x)}$$

$$(\text{III.3.37})$$

Unde  $\mathcal{A}$  reprezintă amplitudinea complexă a undei plane progresive ce se propagă cu viteza  $C$  iar  $\mathcal{B}$  analog pentru unda care se întoarce, respectiv:

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}e^{i\varphi_A}$$

și

$$\mathcal{B} = \mathcal{B}e^{i\varphi_B}$$

$$(\text{III.3.38})$$

încât

$$\phi = \mathcal{A}e^{i[k(ct-x)+\varphi_A]} + \mathcal{B}e^{i[k(ct+x)+\varphi_B]}$$

$$(\text{III.3.39})$$

unde  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  reprezintă numărul de undă.

### III.3.3 Ecuația unei cilindrice

Considerând sistemul de axe cilindrice și elementul de volum  $dV$  (fig. III.3.3.), cu relațiile:

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

$$z = z$$

respectiv  $V_z = 0$ ;  $\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$ , ecuația diferențială tridimensională (III.3.26) devine:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (III.3.47)$$

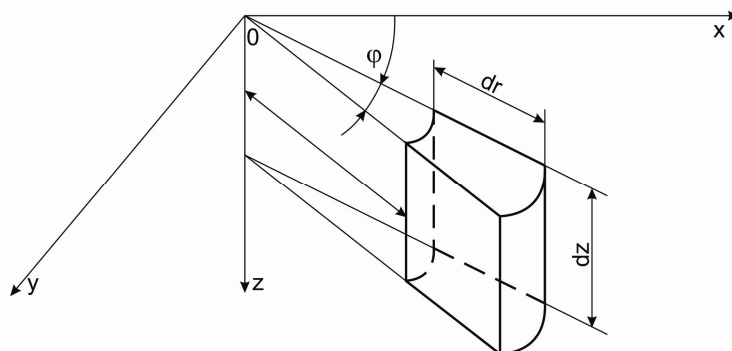


Fig. III.3.3. Elementul de volum în coordonate cilindrice

### III.3.4. Ecuația unei sferice

Considerând sistemul de axe sferice și elementul de volum  $dV$  (fig III.3.4), precum și ecuațiile:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$z = r \cos \theta$$

$$(III.3.56)$$

unde  $\theta$  – unghiul polar

$\varphi$  – azimutul

laplacianul ia forma:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2}$$

respectiv ecuația tridimensională a unei sferice este:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c^2 \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} \right]$$

Considerând mișcarea numai pe direcția razei polare ecuația devine:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad \text{sau:} \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} (r\phi) = c^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\phi) \quad (III.3.57)$$

unde considerând  $r\phi$  ca o singură variabilă, ecuația (III.3.57) este analogă cu ecuația unidimensională a unei plane (III.3.27) și soluția ecuației va fi analog:

$$r\phi = f_1(ct - r) + f_2(ct + r) \quad \text{sau} \quad \phi = \frac{1}{r} f_1(ct - r) + \frac{1}{r} f_2(ct + r) \quad (III.3.58)$$



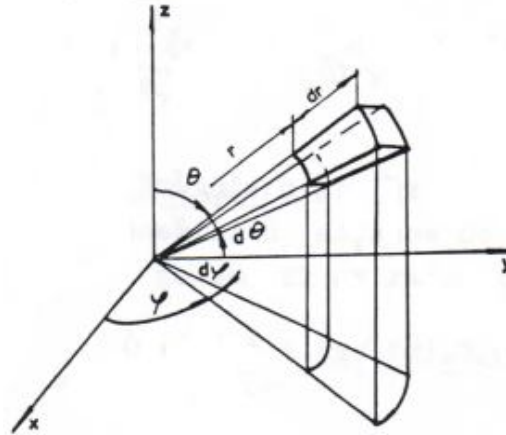


Fig. III.3.4 Elementul de volum în coordonate sferice

### III.3.5. Ecuația de propagare cu disipare

Întrucât betonul proaspăt se manifestă ca un mediu disipativ cu frecare vâscoasă, ecuația de mișcare  $-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}$  se modifică ținând cont de factorul de proporționalitate al rezistenței cu viteza  $\eta$ , astfel:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \eta v$$

(III.3.68)

Din relațiile (III.2.8), (III.3.2) și (III.3.5) rezultă:

$$p = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \frac{\rho' - \rho_0}{\rho_0} \rho_0 = c^2 \rho_0$$

(III.3.69)

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x^2}$$

(III.3.70)

Care diferențiată și întrucât  $v = \frac{\partial \xi}{\partial t}$ , conduce la:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

(III.3.71)

Înlocuind (III.3.71) în (III.3.68) rezultă ecuația diferențială a propagării undelor în beton:

$$\rho_0 c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad \text{sau} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial \xi}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

(III.3.72)

Soluția generală a ecuației este de forma:

$$\xi = A_1 e^{i(\omega t + \gamma' x)} + A_2 e^{i(\omega t - \gamma' x)}$$

(III.3.73)

unde  $\gamma'$  este o mărime complexă numită constantă de propagare a undei.

### III.4. Caracterizarea procesului de compactare prin vibrare

Vibrarea betonului în stare proaspătă duce la realizarea unui proces de compactare capabil să mărească, în mod deosebit, rezistența acestuia după întărire.

Procesul de compactare a betonului poate fi optimizat din punct de vedere al operației de vibrare numai în condițiile în care celelalte operații tehnologice sunt perfect determinate și respectate, astfel:

- alegerea componentelor (apă, ciment, agregate, aditivi);
- dozarea lor după o structură granulometrică dată;

- amestecarea și punerea în operă.

Procesul de întărire prin vibrație a betonului constă din două etape:

- formarea scheletului de agregate prin împănare și apariția vinelor de beton vâscos;
- apariția unei structuri stabile a betonului, ca urmare a realizării unui echilibru între forțele vâscoase, de frecare internă și de vibrație, în această stare, betonul are o suprafață umedă și lucioasă, iar structura sa se caracterizează prin proprietăți tixotropice.

Din studiul proceselor fizico-mecanice la compactarea prin vibrație a betonului, se desprinde concluzia că în dinamica sistemului vibrator-beton, se pot defini, din punct de vedere reologic, două faze: faza tranzitorie și faza de regim.

**Faza tranzitorie**, ce apare la începutul vibrației, se caracterizează prin creșterea energiei interne a particulelor, apariția de modificări importante ale caracteristicilor reologice ale betonului, având drept efect, transformarea betonului într-o suspensie de agregate în pasta de ciment, cu caracteristici de fluid vâscos.

Aceste fenomene tixotropice apar într-o perioadă relativ scurtă a procesului de compactare, acestea având o durată de 5-15%, din procesul de compactare.

În faza care se instalează după fluidificarea masei de beton supusă vibrațiilor, consideră **fază de regim**, sistemul vibrator lucrează la parametrii cvasiconstanți, având în vedere variația lor lentă, asimptotică, spre valori stabile.

**Compactarea** poate fi **naturală** și **forțată**.

**Compactarea naturală** are loc în felul următor: acțiunile exterioare aleatorii strică echilibrul între forțele de frecare, de aderență și greutatea particulelor. Pentru scurt timp, forța greutății proprii a particulelor este mai mare decât forțele de frecare și aderență. Sub acțiunea greutății proprii, particulele intră în mișcare, tinzând să ocupe poziția cea mai de jos. Se produce o regrupare a dispunerii particulelor în mod compact, volumul amestecului se reduce și amestecul se compactează.

**Compactarea forțată** se face în mod analog: printr-o acțiune din afară se caută să se anihileze forțele de frecare și aderență între particulele amestecului și să li se transmită acestora acele mișcări la care se produce reșezarea particulelor în mod compact, distanța între particule se reduce, iar amestecul se compactează. Fiecare particulă a amestecului trebuie să primească un impuls inițial suficient pentru a-i perturba forțele de frecare și aderență cu particula vecină, iar după aceea să primească în continuare impulsuri suplimentare pentru a-i menține mișcarea oscilatorie sau haotică.

#### III.4.1. Influența factorilor reologici în procesul de compactare prin vibrarea betonului

Pornind de la aceste considerente, s-a stabilit accelerația pentru vibrator. Dacă  $A$  – amplitudinea corpului vibratorului, iar  $\omega$  – viteza unghiulară de rotație a axului vibratorului și luăm  $w = A\omega^2$ , condiția alegerii accelerației vibratorului, este  $A\omega^2 \geq \frac{1}{2}g$ .

Mecanismul vibrocompactării, potrivit lui M. Alexander [1] constă în asigurarea vârtejurilor și a mișcării turbulente în amestec. El consideră că, compactarea cu presiune statică este însoțită doar de deformații, atât elastice cât și remanente. În cazul vibrocompactării se produc numai deplasări finite ale particulelor, fără deformare, de aceea notarea ecuațiilor diferențiale ale amestecului cu mediu compact este de prisos. Dimpotrivă, I.D. Dewar [27] consideră ca principale procese de deformare.

În realitate, compactarea statică și cea dinamică sunt însoțite atât de deplasări finite ale particulelor amestecului, cât și de deformații ale amestecului ca mediu continuu.

Existența deformațiilor și deplasărilor finite fac dificilă studierea mișcării amestecului, deoarece pe lângă parametrii continui, ce caracterizează întregul amestec, pentru care se poate scrie un sistem de ecuații diferențiale, mai există și deplasări ale unor puncte ale amestecului. Fiecare punct "fizic" al amestecului ia parte simultan la două mișcări:

- una generală, care reprezintă deplasarea corespunzătoare deformațiilor continue ale amestecului ca un corp elastic, elasto-vâscos, elasto-plasto-vâscos etc.;
- una relativă, care reprezintă deplasarea unei particule ca pe a unui corp absolut solid. Conform acesteia, avem tensiunile  $P_{ik}$  ( $i, k=1,2,3$ ), deplasarea  $U_i$ , șase deplasări finite  $x_j, y_j, z_j, \Psi_j, \theta_j, \varphi_j$ .

În mecanismul compactării propuse de diferiți autori, nu este luat întotdeauna în considerație caracterul acțiunilor exterioare care provoacă compactarea amestecului. Mecanismul compactării depinde de felul instalației de compactare folosite: centrifugă, mai, cilindru compactor, vibrator sau o combinație a acestora.

#### **a) Autocompactarea (compactarea naturală)**

Analizînd o componentă minerală a amestecului – un corp material fizic – constatăm că asupra lui acționează forța greutății proprii și forța mediului. În cazul mișcării, punctul material atinge după sine numai o parte din particulele amestecului. În amestec există totdeauna două feluri de frecare: frecarea proprie lichidelor și frecarea proprie corpurilor solide. Forțele mediului le vom considera ca fiind formate din forțele de menținere hidraulică (calculate după legea lui Arhimede)  $P_a$ , forțele de frecare uscată ale alunecării și forțele de frecare vâscoasă. Forța frecării uscate  $T_0$  a alunecării o prezentăm în forma:

$$\bar{T} = f\bar{N} + \bar{k}_0$$

(III.4.5.)

unde  $N$  este presiunea normală;

$k_0$  – forța de aderență între particulele amestecului;

$f$  – coeficientul de frecare al alunecării.

#### **b) Compactarea forțată în regim dinamic stabilizat**

Pentru analiză este necesară îndeplinirea a cel puțin două condiții:

- să scoatem punctele amestecului din condiția de echilibru, în care scop rezultanta forțelor care produc compactarea trebuie să fie mai mare decât rezultanta forțelor care împiedică compactarea;

- pentru compactare este necesar ca particulele amestecului să capete o mișcare oscilatorie instabilă în jurul pozițiilor medii. Pentru menținerea mișcării oscilatorii, particulelor amestecului trebuie să li se transmită continuu o cantitate corespunzătoare de energie, care să nu fie mai mică decât lucrul forțelor de frecare și aderență, care acționează asupra particulei date.

#### **c) Concluzii parțiale**

Mecanismul compactării prin vibrație impune studierea mișcării atât a vibratorului cât și a amestecului. Modelul cel mai general: vibrator – un sistem de două corpuri (corpul și axul vibratorului) și amestecul – un sistem de puncte materiale (corpuri) într-un mediu continuu oarecare. În acest caz punctele sistemului sunt toate componentele minerale posibile ale amestecului, iar mediul este un corp reologic cu anumite proprietăți. În funcție de condițiile problemei și de gradul de precizie cerut, în model se introduc simplificări. Astfel, dacă trebuie studiată numai mișcarea vibratorului, acțiunea amestecului este înlocuită cu forțe, iar mișcarea acestuia este neglizată. Înlocuirea amestecului cu forțe poate fi justificată

numai în cazul când mișcarea amestecului nu are o influență esențială asupra caracterului mișcării vibratorului sau nu prezintă interes în sensul problemei. Dar în problema compactării betonului, cel mai mare interes îl prezintă tocmai mișcarea acestuia. De aceea, la compactarea betonului trebuie avută în vedere atât mișcarea amestecului, cât și cea a vibratorului.

#### **III.4.2. Influența vibrațiilor asupra compactării betonului**

Principalilor parametri de vibrație asupra compactării betonului sunt:

a) Parametrii definitorii de vibrocompactare a betonului:

- frecvența de vibrație: se alege funcție de caracteristicile reologice ale betonului, de masa utilă de beton ce trebuie vibrată, respectiv raportul acesteia față de masa totală de vibrat și de soluția constructivă și anume pulsația proprie a sistemului, respectiv caracteristicile geometrice / dimensionale ale piesei de beton;
- pulsația proprie a sistemului: este funcție de masele utile și funcționale de lucru, respectiv de elementele de amortizare intermediare și finale, determină regimul funcțional de lucru;
- amplitudinea vibrației: se alege funcție de caracteristicile reologice ale betonului și de frecvența de vibrație;
- forța perturbatoare/momentul static al vibratorului: se alege funcție de masa piesei de beton, respectiv masa totală de vibrat, de amplitudinile utile ce trebuie obținute și de caracteristicile reologice ale betonului, care implică nivele bine determinate ale accelerațiilor de vibrație;
- timpul de vibrație: ce se alege funcție de frecvența de vibrație raportată la pulsația proprie a sistemului, a regimului de lucru, de caracteristicile geometrice și funcționale ale piesei de beton și de caracteristicile reologice ale betonului.

b) Parametrii fizico-mecanici de bază ai betoanelor vibrocompactate:

- lucrabilitatea și rigiditatea scontată  $C$ ;
- rezistența la compresiune  $R_c$ ;
- densitatea și coeficientul de compactare, exprimat prin raportul între masa volumetrică pe epruvetă și suma maselor componente;
- durabilitatea, în funcție de:
  - limita de rezistență la compresiune, a epruvetelor supuse încercărilor de stabilitate la îngheț;
  - masa volumetrică a epruvetelor supuse încercărilor de stabilitate la îngheț;
  - viteza ultrasunetelor în epruvetele supuse încercărilor de stabilitate la îngheț;
  - porozitatea integrală, determinată pe baza absorbției de apă.

c) Variația parametrilor fizico-mecanici ai betonului în timpul vibrației:

### **Cap. IV. METODE ENERGETICE DE ANALIZĂ A PROCESULUI DE COMPACTARE PRIN VIBRAȚIE A BETONULUI PROASPĂT**

#### **IV.1. Transmiterea energiei în procesul de compactare**

Transmiterea energiei de la sursă în regiunea mediului care se găsește în stare de vibrație (câmpul de vibrație) are loc sub formă de unde plane, cilindrice și sferice, până la o limită la care energia transmisă este insuficientă pentru a determina modificări în structura betonului.

Betonul supus vibrațiilor suferă modificări importante trecând din fază solidă în aceea de fluid vâscos, energia transmisă prin vibrații ridicând energia internă și mobilitatea agregatelor din beton.

### **Caracteristici specifice ale transmiterii energiei în beton**

#### **a) Densitatea de energie**

Se definește ca energia conținută în unitatea de volum din mediu de propagare.

#### **b) Intensitatea undei**

Conform legii conservării energiei, energia totală produsă de sursă trebuie regăsită în mediu. Raportul dintre fluxul de energie și aria suprafeței normale pe direcția de propagare definește intensitatea undei, respectiv:

$$I = pV \quad (IV.1.30)$$

(intensitatea undei are dimensiunea unei puteri, însă este o mărime vectorială, dirijată pe direcția propagării undei).

#### **c) Nivelul de intensitate al undei**

Conform [14], pentru a putea efectua aprecieri valorice privind unda de vibrație, se folosește nivelul de intensitate definit de relația:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (IV.1.36)$$

unde  $I_0$  este nivelul de referință, ce corespunde pentru vibrarea betonului cu intensitatea minimă ce produce compactarea.

#### **d) Impedanța specifică**

Mărimea ce caracterizează rezistența mediului la propagarea undei este denumită impedanța specifică

## **IV.2. Modelarea macroscopică a comportării globale beton-suport vibrator**

Din studiul fenomenelor de compactare prin vibrare a betonului se desprinde concluzia că în dinamica sistemului vibrator beton se pot defini din punct de vedere reologic două faze și anume faza tranzitorie și faza de regim.

Faza tranzitorie ce apare la începutul vibrării se caracterizează prin creșterea energiei interne a particulelor apariția de modificări importante ale caracteristicilor reologice ale betonului, având drept efect transmiterea betonului într-o suspensie de agregate în pasta de ciment, cu caracteristici de fluid vâscos.

### **IV.2.1. Estimarea rezistenței betonului**

Rezultanta forțelor de rezistență ale betonului la acțiunea vibratorului cuprinde mai multe componente așa cum a rezultat și din analiza comportării reologice a betonului.

### **IV.2.2. Ecuații diferențiale ale sistemului vibrator beton**

Ecuațiile diferențiale ale sistemului vibrator beton se scriu în termeni de coordonate și forțe generalizate utilizând ecuațiile lui Lagrange de speța a II-a.

## Cap V. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU EVALUAREA RĂSPUNSULUI DINAMIC AL BETONULUI PROASPĂT ÎN PROCESUL DE COMPACTARE

### V.1. Materiale componente

Compoziția betonului și materialele componente cu proprietăți specificate sau cu compoziția prescrisă trebuie să fie alese astfel încât să satisfacă cerințele specifice pentru betonul proaspăt și întărit, inclusiv consistența, masa volumică, rezistența, durabilitatea protecția contra coroziunii a pieselor din oțel înclobate, ținând seama de procedeele de producție și metoda prin care se intenționează să se execute lucrările de beton.

Compoziția betonului trebuie stabilită astfel încât să se reducă la minimum fenomenele de segregare și de separare a apei din betonul proaspăt.

Pentru beton, specificarea compoziției este limitată la:

- agregate naturale de masă volumică normală;
- adaosuri în pulbere cu condiția ca acestea să nu fie luate în considerație la calculul dozajului în ciment și al raportului apă/ciment;
- dozajul minim de ciment;
- tipul cimentului;
- aditivi, cu excepția antrenorilor de aer;
- compozițiile ce îndeplinesc criteriile pentru efectuarea încercărilor inițiale de tip.

### Alegerea cimentului

Cimentul trebuie ales dintre cele a căror aptitudine de utilizare este stabilită, luând în considerație:

- tehnologia de execuție a lucrării;
- utilizarea finală a betonului;
- condițiile de tratare (de exemplu tratament tehnic);
- dimensiunile structurii (dezvoltarea căldurii de hidratare);
- agresiunile mediului înconjurător la care este expusă structura;
- reactivitatea potențială a agregatelor față de alcaliile din materiale componente.

### Utilizare agregatelor

Tipul, dimensiunile și categoriile de agregate privind de exemplu, aplatizarea, rezistența la îngheț-dezghet, abraziunea, rezistența, conținutul de părți fine, etc. trebuie să fie secționat ținând seama de:

- tehnologia de executare a lucrării;
- utilizarea finală a betonului;
- cerințele de mediu înconjurător la care va fi supus betonul;
- toate cerințele pentru agregate aparente sau agregatele pentru betonul decorativ.

Dimensiunea maximă nominală superioară a agregatului trebuie secționată ținând seama de grosimea acoperirii cu beton a armăturilor și dimensiunea minimă a secțiunii elementelor.

### Utilizarea aditivilor

Cantitatea totală de aditivi eventual utilizați nu trebuie să depășească dozajul maxim recomandat, de producătorul de aditivi și nu trebuie să fie mai mare de 50g aditiv (în stare de livrare) pe kg de ciment, în afară de cazul când s-a stabilit influența unui dozaj mai ridicat asupra performanțelor și durabilității betonului.

### **Echipamente de realizare a betonului: malaxor și masă vibrantă**

Malaxorul utilizat este un malaxor utilizat în laborator și are următoarele caracteristici: capacitate utilă 120 litri, putere motor 0,6kw/3000rpm

Masa vibrantă are următoarele caracteristici putere 1000W, amplitudine 3000 rot/min, pulsația forței perturbatoare 314 rad/sec, frecvența este de 50Hz

### **V.2. Metode de încercare pentru verificarea calității betonului**

După fiecare șarjă de beton realizat s-au făcut următoarele determinări atât pe beton proaspăt cât și pe beton întărit.

Beton proaspăt:

- determinarea densității – Anexa V.2.1;
- determinarea tasării – Anexa V.2.2

Beton întărit:

- determinarea densității betonului întărit – Anexa V.2.3;
- determinarea rezistenței la compresiune – Anexa V.2.4;
- determinarea rezistenței la întindere prin despicare – Anexa V.2.5;
- determinarea adâncimii de pătrundere a apei sub presiune – Anexa V.2.6;
- determinarea pierderii de rezistență după ciclurile de îngheț-dezghet – Anexa V.2.7.

### **V.3. ÎNCERCĂRI NECESARE PENTRU VERIFICAREA CALITĂȚII AGREGATELOR MINERALE (agregate naturale și/sau concasate):**

- granulometrie – Anexa V.3.1;
- coeficient de aplatizare – Anexa V.3.2;
- coeficient de formă – Anexa V.3.3;
- echivalent de nisip – Anexa V.3.4;
- rezistența la sfărâmare – Los Angeles – Anexa V.3.5;
- rezistența la uzură – micro Deval – Anexa V.3.6;
- absorbția de apă – Anexa V.3.7;
- rezistența la abraziune – Anexa V.3.8;
- rezistența la îngheț-dezghet – Anexa V.3.9.

### **V.4. ÎNCERCĂRI NECESARE PENTRU VERIFICAREA CALITĂȚII CIMENTULUI:**

- determinarea timpului de priză – Anexa V.4.1;
- determinarea stabilității – Anexa V.4.2;
- determinarea rezistențelor mecanice – Anexa V.4.3.

### **V.5. DETERMINAREA DURATEI OPTIME DE VIBRARE DE COMPACTARE DINAMICĂ**

Determinarea duratei optime de vibrare de compactare dinamică pe două clase de beton și anume C35/45 și C40/50.

Pentru stabilirea unei rețete de beton trebuie să se țină cont de mai mulți factori:

- caracteristicile și rezistențele agregatelor utilizate;
- rezistențele mecanice ale betonului;
- conținutului de parte fină din beton, ciment, nisip și adaosuri dacă este cazul;
- tipul de aditiv utilizat.

Un beton trebuie să îndeplinească simultan trei categorii de exigențe:

- lucrabilitatea, pentru a putea fi pus în operă;

- rezistențele mecanice, pentru a rezista solicitărilor mecanice;
- durabilitatea, pentru a rezista acțiunilor fizico-chimice de mediu.

Elaborarea unei rețete de beton, este o problemă complexă, pentru că trebuie luate în considerație toate cunoștințele referitoare la proprietățile materialelor și betonului, în legătură cu comportarea construcțiilor din beton.

Determinarea duratei optime de vibrare s-a realizat prin încercări succesive, și anume, aceeași clasă de beton realizată în aceleași condiții s-a vibrat la timpi diferiți. După realizarea maturității betonului s-au încercat probele prelevate la diferiți timpi de vibrare și s-a determinat rezistențele mecanice ale betonului. În figurile IV.5.1 și IV.5.2 se pot observa punctele de minim și de maxim ale curbei, implicit se observă durata optimă de vibrare pentru fiecare clasă în parte.

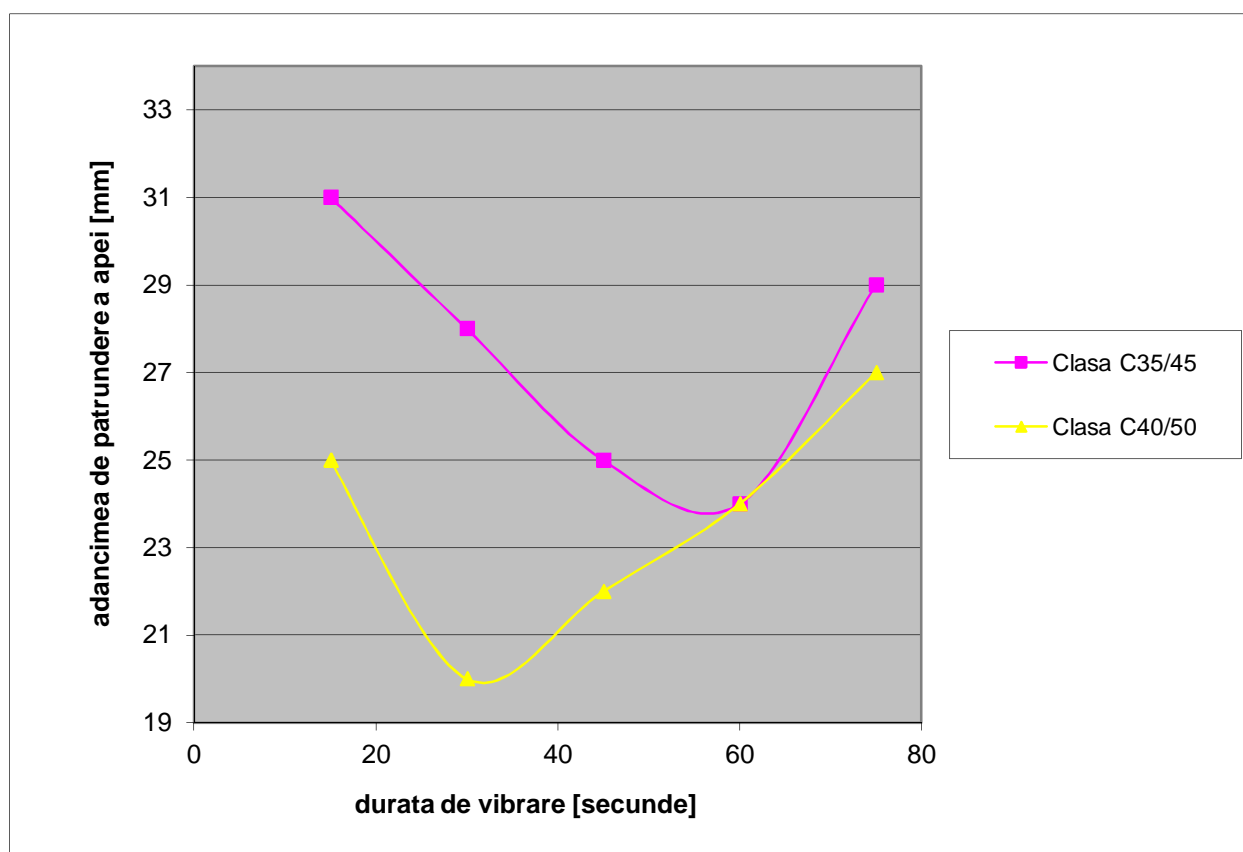


Fig. V.5.1. Reprezentarea grafică a adâncimii de pătrundere a apei în cuburile de beton



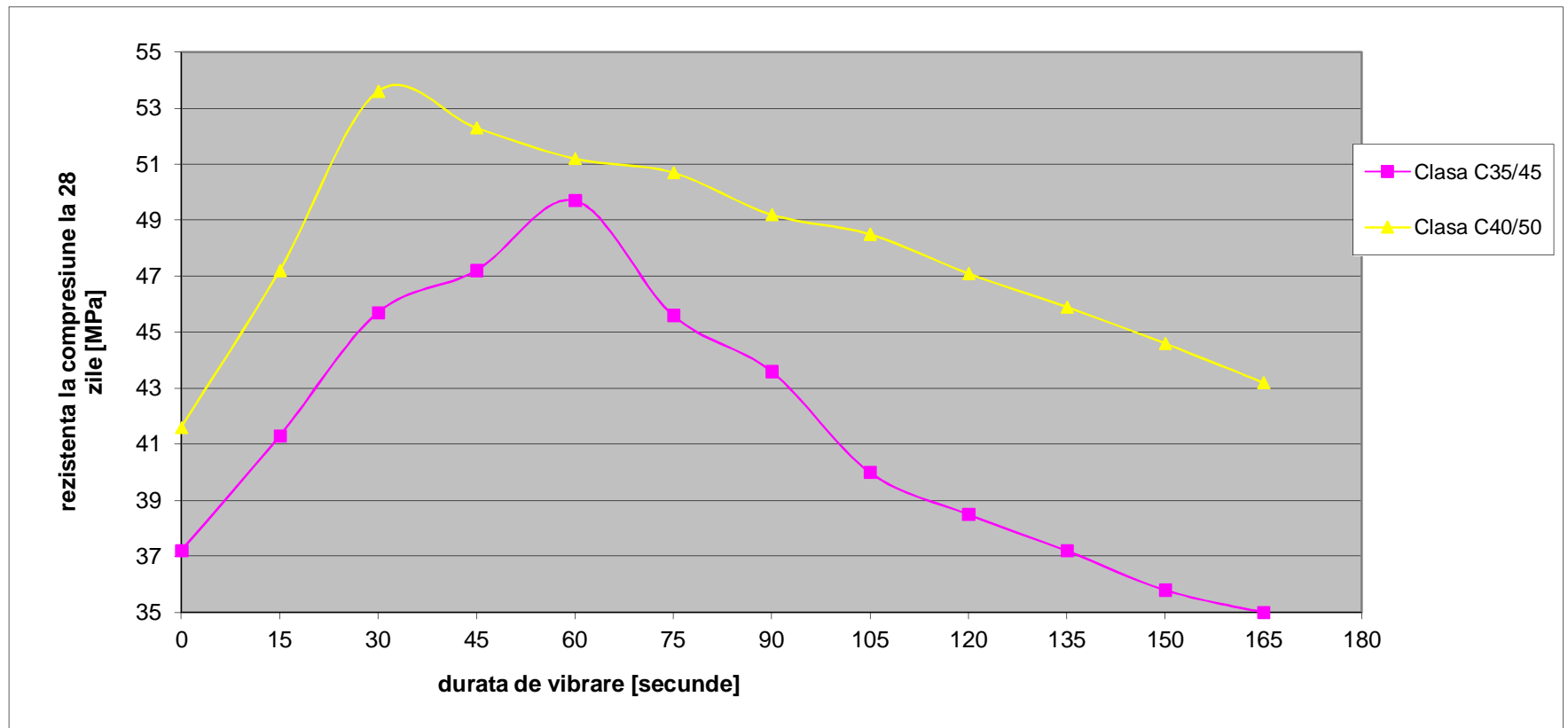


Fig. V.5.2. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 28 zile pe cuburile de beton

### Concluzii

Durata de vibrare sub valoarea duratei optime duce la valori mici ale rezistenței betonului întărit, iar duratele de vibrare mult mai mari decât durata optimă poate să ducă la compromiterea betonului realizat, adică la scăderea rezistențelor și implicit se realizează segregarea prin supracompactare.

### V.6. DETERMINAREA DURATEI OPTIME DE MALAXARE ÎN CORELAȚIE CU DURATA OPTIMĂ DE VIBRARE

Determinarea duratei optime de malaxare s-a realizat prin încercări succesive, și anume, aceeași clasă de beton realizată în aceleași condiții s-a malaxat la timpi diferiți și realizarea cuburilor de beton la vibrarea optimă. După realizarea maturității betonului s-au încercat probele prelevate la diferiți timpi de malaxare și vibrare la timpul optim de vibrație, și s-a determinat rezistențele mecanice ale betonului. În figurile V.6.1, V.6.2, V.6.3 și V.6.4 se pot observa punctele de minim și de maxim ale curbei, implicit se observă durata optimă de malaxare pentru fiecare clasă în parte.

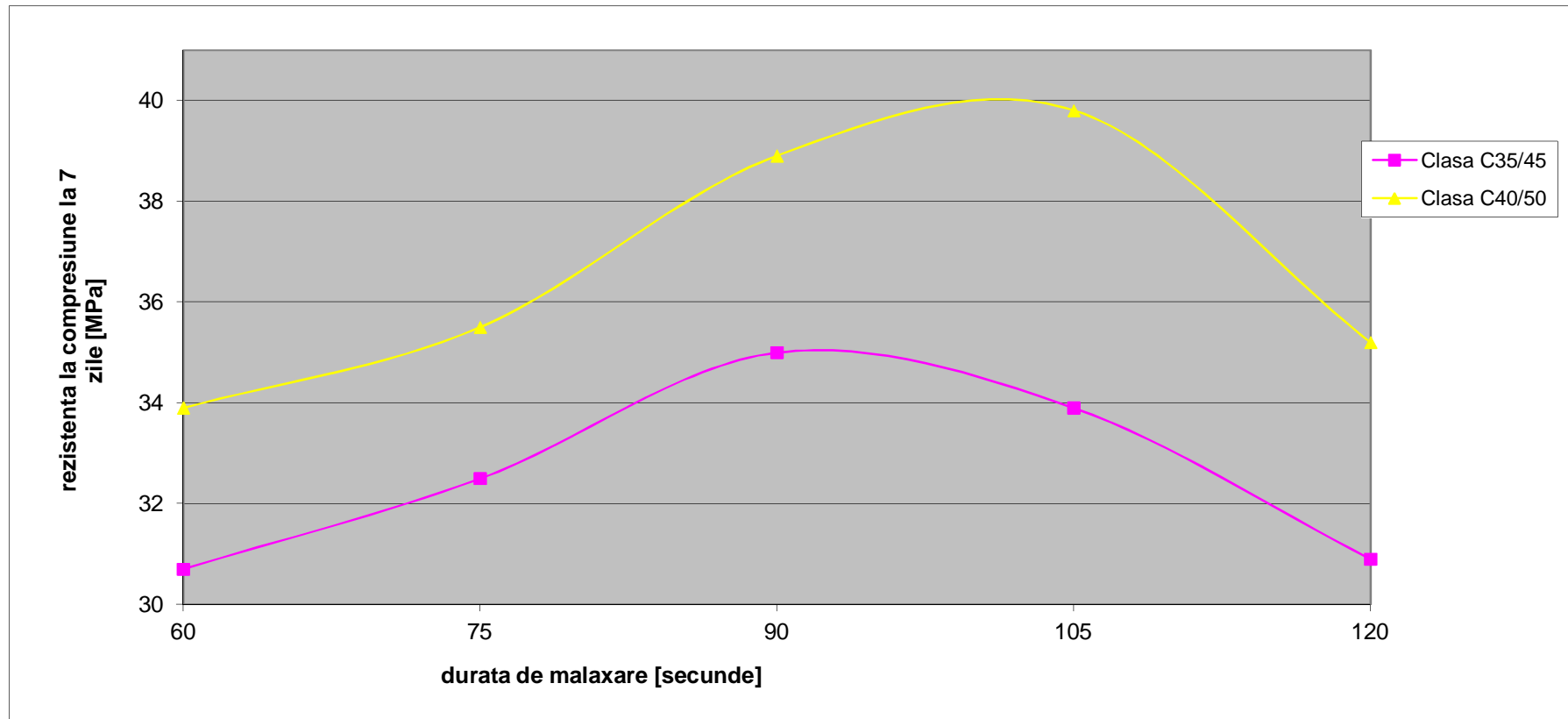


Fig. V.6.1. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 7 zile pe cuburile de beton

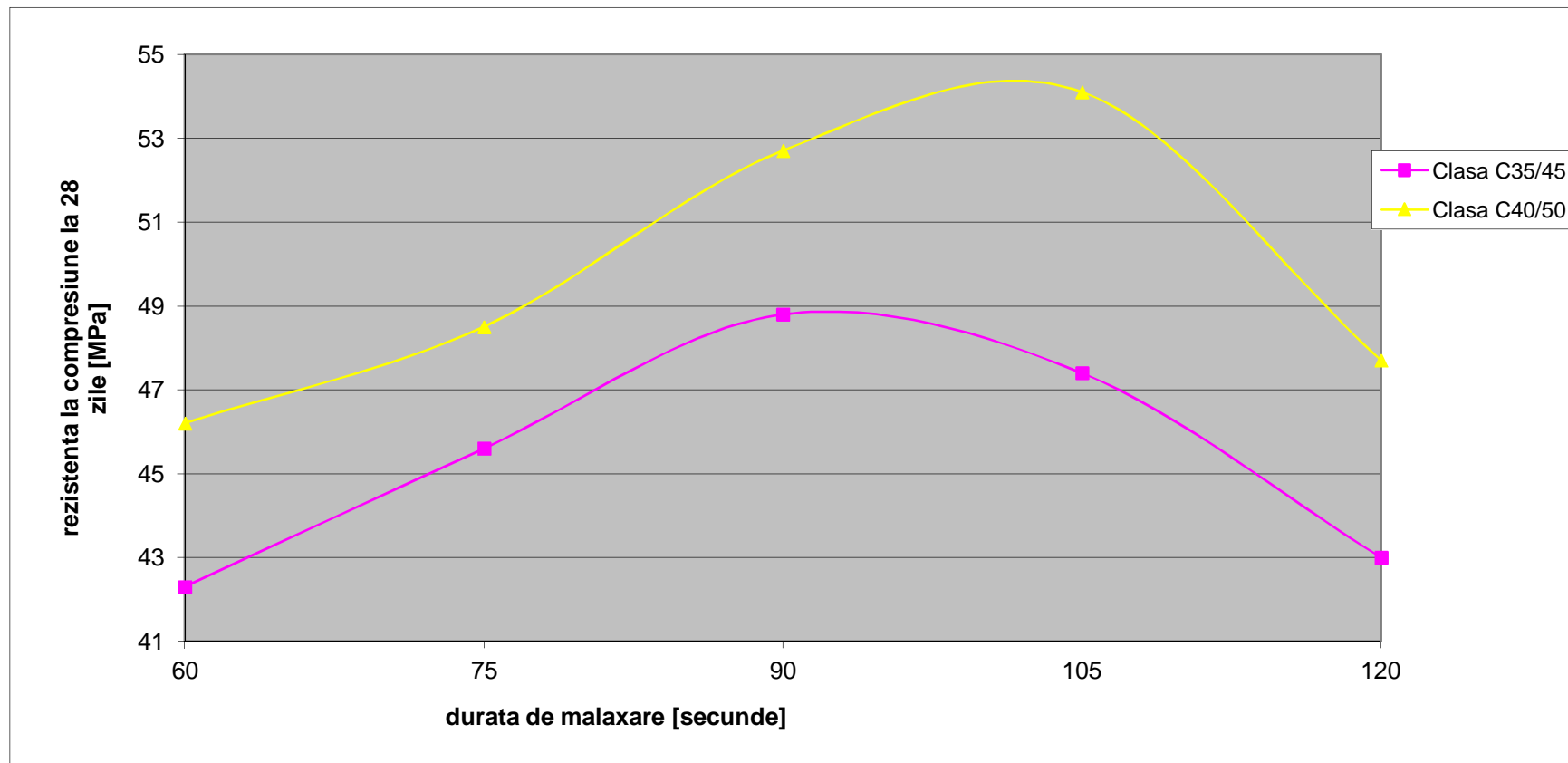


Fig. V.6.2. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 28 zile pe cuburile de beton

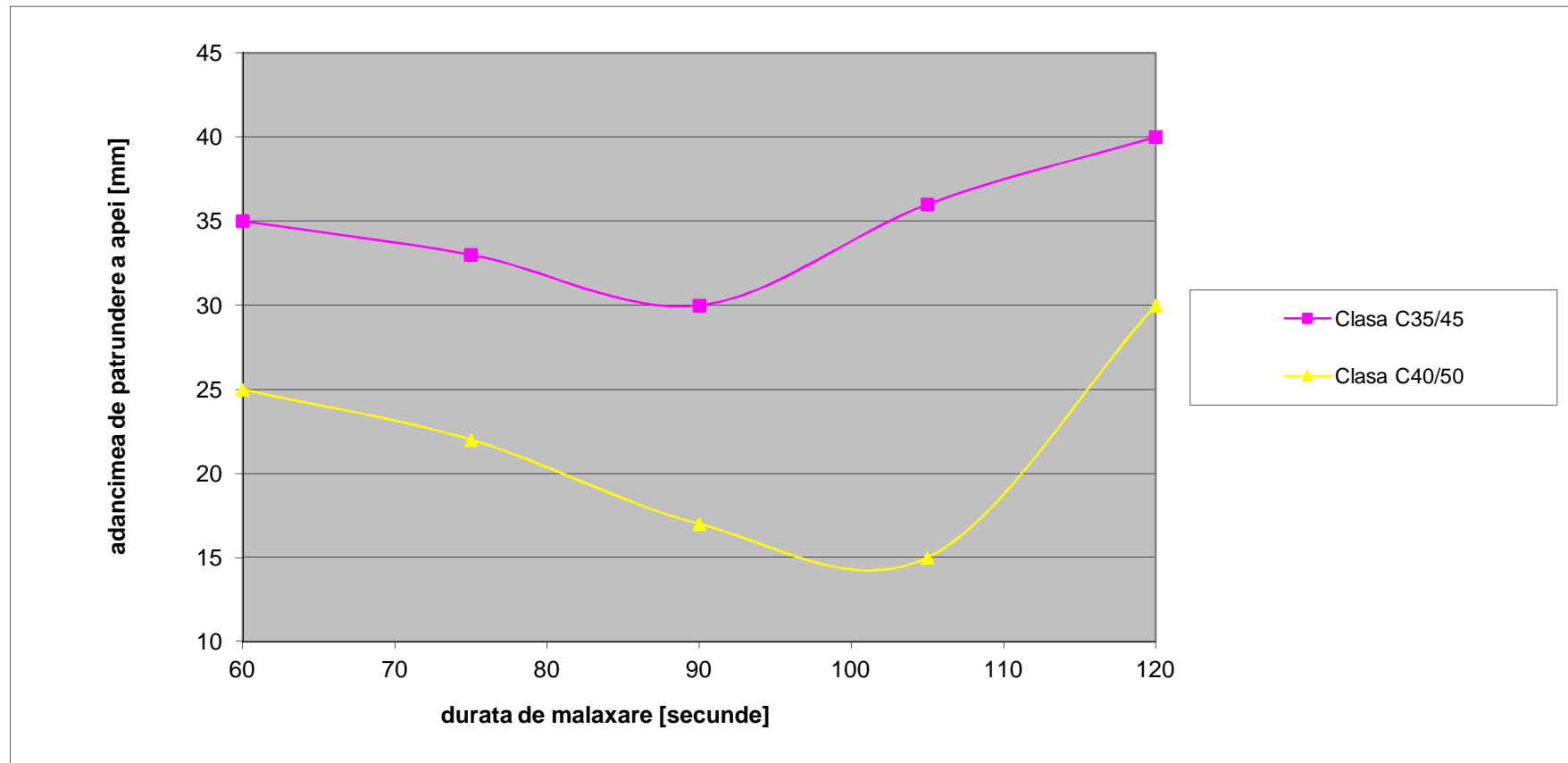


Fig. V.6.3. Reprezentarea grafică a adâncimii de pătrundere a apei în cuburile de beton

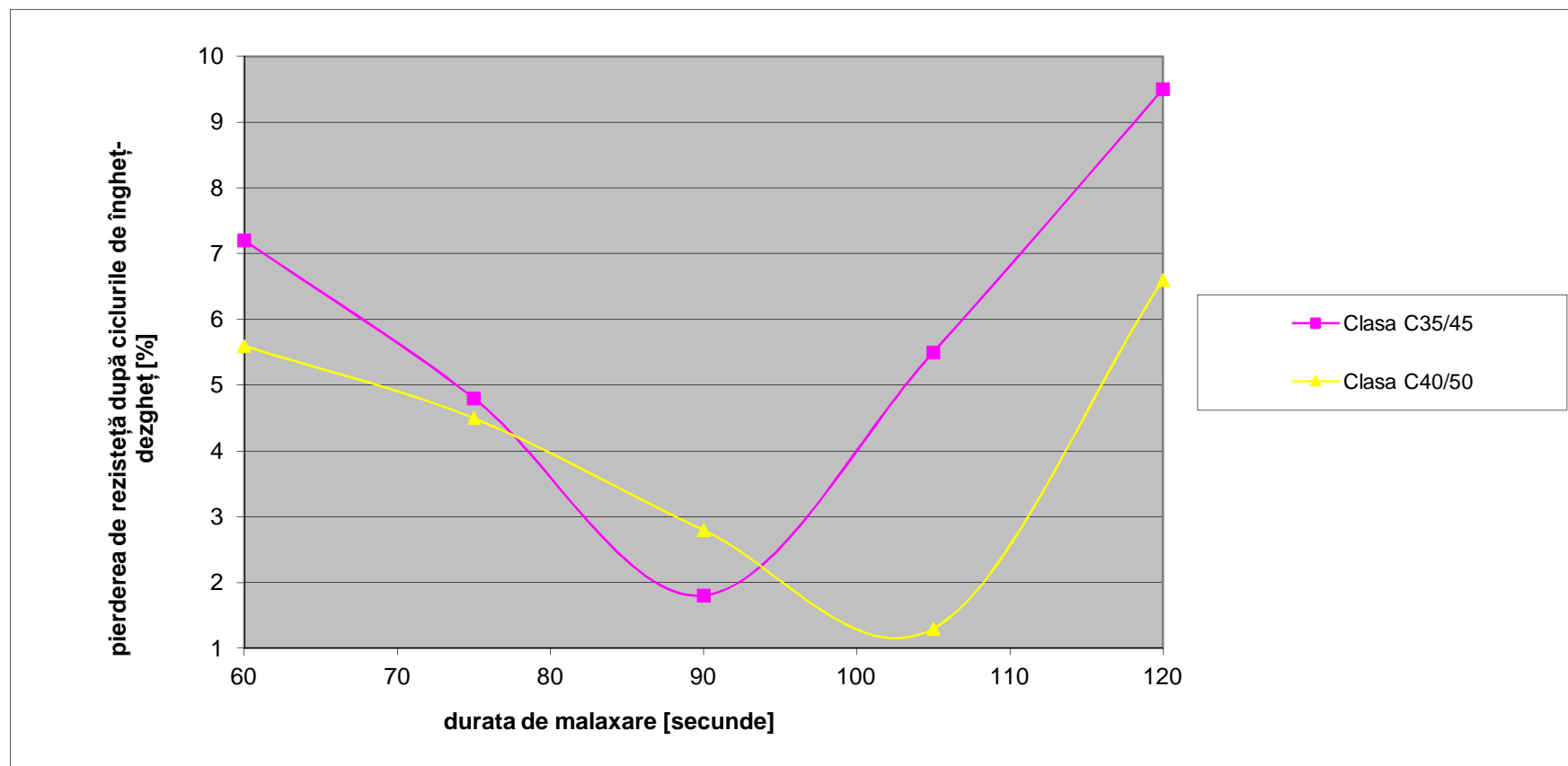


Fig. V.6.4. Reprezentarea grafică a pierderii de rezistență după ciclurile de îngheț-dezghet pe cuburile de beton

### Concluzii

Durata optimă de malaxare pentru vibrat într-un interval de timp optim poate fi caracterizată astfel:

- durata de malaxare mai mică decât optimum de malaxare implică atingerea unei rezistențe la compresiune mai mici decât rezistența optimă;

- durata de malaxare ale cărei valori depășesc durata optimă de malaxare duce la valori ale rezistenței care se află pe o ramură descrescătoare ale curbei prezentate în figurile V.6.1. și V.6.2.

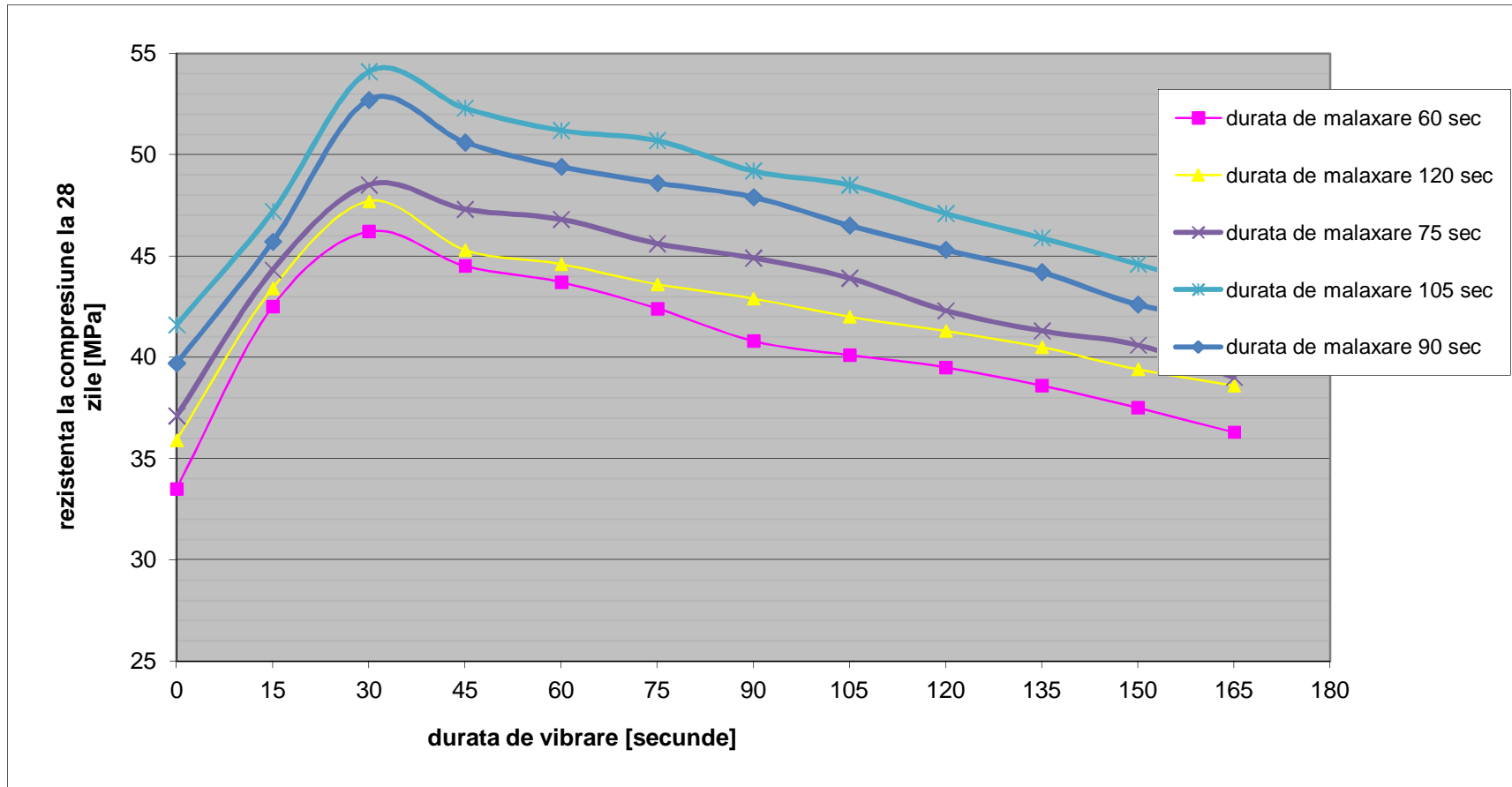


Fig. V.6.5. Reprezentarea grafică a rezultatelor obținute prin încercări pentru clasa de beton C35/45

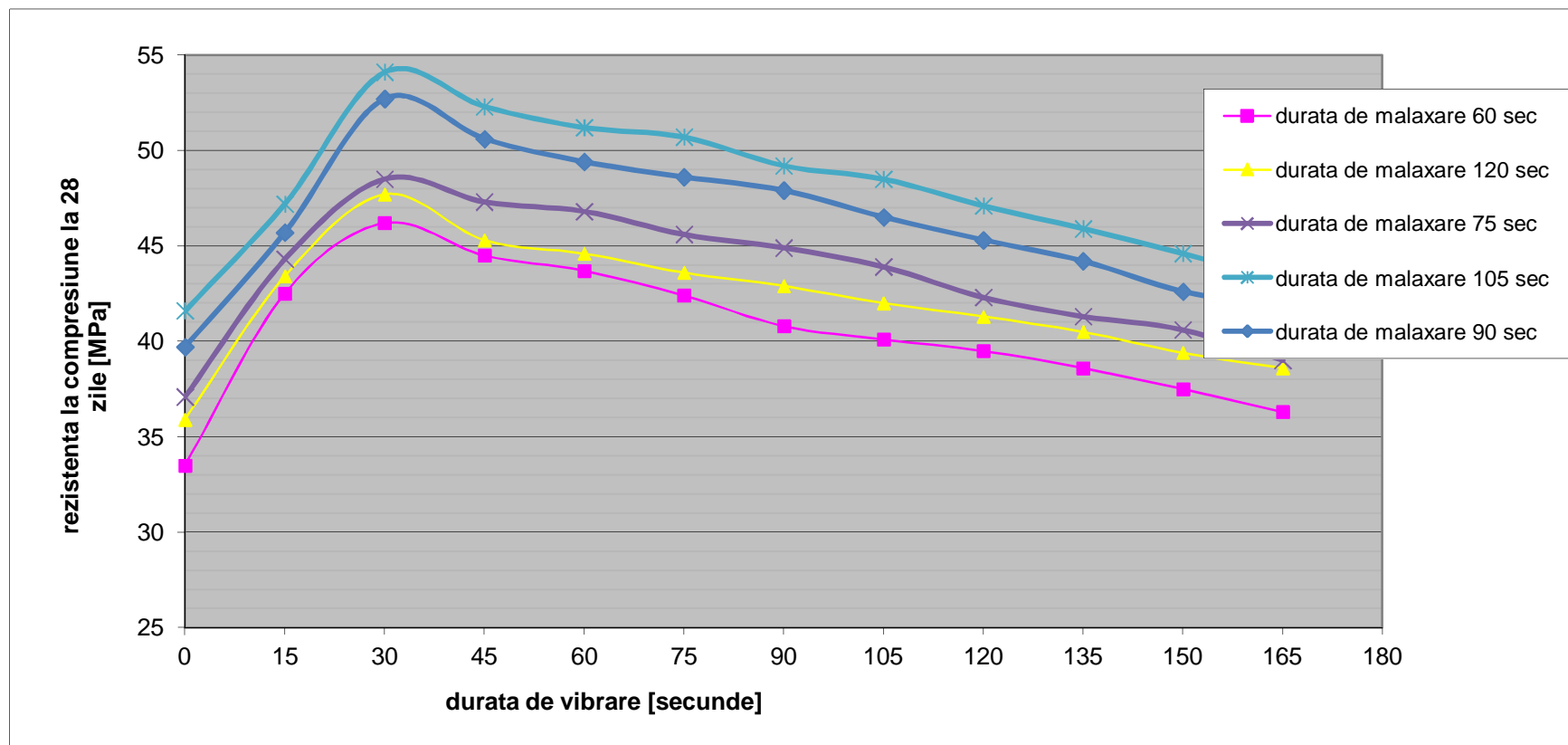


Fig. V.6.6. Reprezentarea grafică a rezultatelor obținute prin încercări pentru clasa de beton C40/50

## Cap. VI. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Rezultatele cercetărilor efectuate au fost sintetizate în teză și pot evidenția metodele și modelele reologice ale betonului proaspăt în procesul de vibrare.

Ansamblul concluziilor parțiale corespunzătoare fiecărei etape a tezei asigură baza concluziilor generale în corelație cu cerințele impuse prin obiectivele inițiale ale tezei, ce pot fi sintetizate astfel:

- Analiza influenței componentelor din structura rețetelor de beton: agregate, ciment, apă, aditivi, adaosuri.
- Caracterizarea proceselor macroscopice și microscopic ale betonului în regim de vibrare:
  - rigiditate;
  - vâscozitate dinamică;
  - disipare internă a energiei;
  - modelare reologică.
- Caracterizarea betonului proaspăt în procesul de vibrare astfel:
  - în procesul ondulatoriu adică de propagare a undelor longitudinal și transversal (slabe) de supercizitate;
  - în procesul de compactare în masa betonului cu diminuarea volumului de aer oclus și reducerea apei din beton.
- Stabilirea metodelor energetice specifice procesului de compactare prin vibrare a betonului proaspăt după cum urmează:
  - modelarea sistemului masă de beton suprafață de compactare sub forma schematizărilor Kelvin, Maxwell și Newton;
  - adoptarea sistemului cu două mase cu legătură vâscoasă între acestea având la bază modelul Newton cu excitație de forță inerțială rotitoare armonică adică de forma  $F(t) = m_0 r \omega^2 \sin \omega t$ ;
  - formularea ecuațiilor diferențiale de mișcare în regim de vibrație forțată staționară;
  - stabilirea și verificarea energiei de vibrare stabilită atât pe baza funcției energetice  $Wd$  în raport cu  $\omega$  care trebuie să fie în concordanță cu aria delimitată de bucla histerezică de forma unei elipse.
- Stabilirea metodelor și procedurilor experimentale pentru verificarea caracteristicilor optime de vibrare, de expunere la regimul de vibrații cât și a duratei de malaxare a betonului proaspăt:
  - determinarea duratei optime de vibrare prin expunerea betonului proaspăt în procesul de compactare la un regim dinamic stabil adică la  $\omega=314$  rad/sec (3000 rot/min) și amplitudinea de vibrație de 0,5mm cu o forță perturbatoare ce corecunde valorii  $F(t) = m_0 r \omega^2 \sin \omega t$ . În consecință ca urmare a experimentărilor s-a obținut durata optimă de vibrare ca fiind o caracteristică a amestecului de beton după cum urmează:
    - legea de variație a energiei disipate în regim staționar de vibrații pentru procesul de compactare;
    - valoarea maximă a energiei disipate prin corelația pulsației de excitație cu masa de beton și constanta vâscoasă de disipare a energiei;



- ridicarea buclelor histerezice în funcție de parametrii de vibrație  $A_1$ ,  $\omega$  și de masa  $m_2$  și constanta de amortizare  $c$  a betonului proaspăt
- stabilirea duratei optime de malaxare pentru un amestec de beton care va fi vibrat la durata optimă de vibrație.
- Curbele parțial obținute pentru fiecare etapă experimentală în parte atât pentru malaxare cât și vibrație se caracterizează printr-un optim al rezistenței betonului la compresiune ce corespunde unei durate corespunzătoare;
- Valorile maxime ale rezistenței la compresiune a betonului întărit la durate de vibrație, respectiv malaxare.

### **VI.1. Contribuții personale**

Rezultatele cercetărilor efectuate, cât și soluțiile tehnice inovative adoptate se pot constitui în contribuții relevante ale autoarei prezentei teze de doctorat după cum urmează:

- modelarea reologică a procesului de compactare a betonului proaspăt;
- stabilirea parametrilor de vibrație exprimați prin amplitudinea masei betonului, amplitudinea tiparului vibrator, forța maximă transmisă betonului;
- stabilirea energiei disipative în funcție de pulsația  $\omega$ , masa betonului și coeficientul de amortizare vâscoasă a betonului;
- stabilirea ecuațiilor curbelor histerezice de forma unor elipse parametrizate prin pulsația  $\omega$  la valori discrete  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  și trasarea curbelor histerezice  $Q_x$ ;
- optimizarea duratelor de malaxare și vibrație pentru atingerea rezistențelor maxime a betonului întărit după 28 zile atât pe bază experimentală cât și pe bază rezultate teoretice obținute din modelarea adoptată.

### **VI.2. Direcții viitoare de cercetare**

Direcțiile viitoare de cercetare, țin seama de obiectivele și rezultatele acestei teze prin faptul că rezultatele obținute oferă baza unei dezvoltări viitoare a unor noi metode de implementare pe scară largă a procesului de compactare prin vibrație a betonului proaspăt la punerea în operă.

În acest sens se propun următoarele direcții principale de continuare a cercetărilor și anume:

- stabilirea metodelor de corelare parametrică a funcțiilor de transfer între sistemul virtual și cel real;
- conceperea și dezvoltarea unor sisteme de vibrație eficiente pentru realizarea elementelor din beton fără riscul de a se produce segregarea;
- conceperea și realizarea unui sistem de generare a vibrațiilor cu parametri variabili (amplitudine, frecvență) care va fi conceput astfel încât să poată transmite vibrații punctuale, vibrații distribuite pe suprafață, cât și vibrații distribuite în volumul betonului sub forma undelor elastice;
- conceperea și realizarea unui sistem instrumental și informatic de control și reglare, în timp real, a parametrilor de vibrație cât și a parametrilor de răspuns ce caracterizează comportamentul reologic betonului proaspăt din tipar în timpul procesului de compactare;
- realizarea, într-o concepție modulară, a unor sisteme de mese vibrante, reazeme vibrante pentru tipare cu regim variabil de vibrații peste care se află tiparul elementului din beton;

- conceperea și realizarea unor variante de rețete (minim 5) prin modificarea compoziției microstructurale și prin modelarea reologică neliniară a betonului proaspăt cu posibilitatea de monitorizare a rigidității dinamice și a coeficientului de analiză vâscoasă în funcție de câmpul vibrațiilor de excitația și de evoluția porozității;
- creșterea gradului de compactare dinamică a betonului cu influențe favorabile măsurării parametric, asupra formării structurii, a reducerii porozității și a permeabilității la apă și gaze și a creșterii rezistențelor betonului.

#### BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Alexander M., Study of vibration in concrete, Report 3, Mechanics of motion of fresh concrete. Concrete Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksbury, Mississippi, 1977.
- [42] Gessler St., Betonul vibrat și tratamentul cu vid. Conf. Dynapac, Copenhaga, 1977.
- [43] Glanville W.H., Collins A.R., Mathews D.D., The grading of aggregate and workability of concrete. Road Research Tech. Paper No. 5, London H.M.S.O., 1947.
- [49] Hayashi C., Forced oscillations in non linear systems. Nippon Printing and publishing Co., Osaka, 1958.
- [50] L'Hermite R., Turon G., La vibration du beton frais. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Paris, 1948.
- [51] L'Hermite R., Idees actuelles sur la technologie du beton, Paris, Dunod, 1955.
- [52] L'Hermite R., Methodes generales d'essai et controle en laboratoire. Eyrolles, Paris, 1959.
- [53] L'Hermite R., Maximillian M., Nouveaux resultats et recentes etudes sur le fluage du beton. Bul. Rilem, Materiaux et Constructions, No. 7, Jan.-Ferv., 1969.
- [56] Hansen K. Torben, Creep and stress relaxation of concrete, Strockholm, 1960.
- [57] Ionescu Gh.D., Introducere în hidraulică. Editura Tehnică, București, 1977.
- [69] Lavariscik E.V., Osobenosti raboti rezonansnîh gorizontalnîh vibroploșciodok. Vibraționnaia tehnica, Moskva, 1966.
- [70] Lea F.M., The chemistry of cement and concrete. London, Arnold, 1970.
- [71] Luca E., Ciubotaru C., Zet Gh., Vasiliu A., Fizica. Editura Didactică și Petagogică, București, 1976.
- [72] Lupan M., Dumitrescu D., Tehnologia betonului. Editura Tehnică, București, 1975.
- [73] Măruță Al., Teoria sonicității și aplicațiile sale tehnice. Editura Academiei de Științe Agricole și Silvice, Instiutul de studii și cercetări pentru îmbunătățiri funciare, București, 1973.
- [74] Mihăilescu St., Bratu P., Goran V., Vlădeanu Al., Aramă St., Mașini de construcții, vol 1-3, Editura Tehnică, București, 1984-1986.
- [77] Moldovan V., Aditivi în betoane. Editura Tehnică, București, 1978.
- [78] Mood A.M., Graybill F.A., Introduction to the theory of statistics. New York, Mc. Graw Hill Book Comp. Inc., 1963.
- [79] Munteanu H., Introducere în dinamica mașinilor vibratoare, Editura Academiei, 1986.
- [92] Powers T.C., The physical structure and engineering properties of concrete. Portl. Cem. Assoc. Research. Dep. Bul. 90 p.39, Chicago, July 1958.
- [93] Powers T.C., The properties of fresh concrete. Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sidney, Toronto, 1968.
- [94] Pancu N., Tovissi I., Statistică matematică cu aplicații în producție. Editura Academiei RSR, București, 1963.
- [95] Rebut P., Ghid practic pentru vibrarea betoanelor (traducere din limba franceză). Editura Tehnică, București, 1967.
- [96] Reiner M., Rheologie theorique. Dunod, Oaris, 1955.
- [97] Rumsiski L.Z., Prelucrarea matematică a datelor experimentale (traducere din limba rusă). Editura Tehnică, București, 1964.
- [98] Raport de etapă M.C.IND. – Contract 3946/1973., Studiu asupra folosirii procesului de compactare a betonului prin vibrare în regim de rezonanță și oscilații orizontale.
- [101] Snowdown I.C., Vibration and shick in damped mechanical systems. John Wiley & Sons, Inc. New York, London, Sidney, 1968.

- [102] Stanciu C., Vibrații și dinamica mașinilor, fascicula 1 și 2. Institutul de Construcții București, 1974 și 1975.
- [105] Ștefănescu Goangă A., Îndrumător de laborator pentru materiale de construcții. Editura Tehnică, 1977.
- [106] Teodoreanu I., Tehnologia betoanelor și azbocimentului. Editura didactică și pedagogică, București, 1977.
- [107] Taylor R.W., The compaction of concrete by internal vibrators – an investigation of the effects of frequency and amplitude. Cement and Concrete Assoc., London, 1976.
- [108] Tiron M., Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate. Editura Tehnică, București, 1972.
- [109] Tiron M., Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare. Editura Tehnică, București, 1976.
- [125] Zubanov M.P., Vibraționnîe mașini dlia uplotnenia betonniîh amesei i grunta. Moskva, 1964.