

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



REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

**ANALIZA DINAMICĂ ÎN PROCESUL DE VIBRARE A
BETONULUI PENTRU MĂRIREA CAPACITĂȚII DE
REZISTENȚĂ**

Doctorand,
Ing. Bordos V. Ruslan

Conducător Științific

Prof. univ. em. dr. ing. dr. h. c. Polidor-Paul BRATU

Membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. Petre ZAFIU

Prof. univ. dr. ing. Cristian PAVEL

Conf. univ. dr. hab. ing. Silviu NĂSTAC

Seria I6 Inginerie Mecanică Nr. 44

GALAȚI

2018

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**

	Nr. Pag.
CUPRINS	1
CUVINTE CHEIE	3
INTRODUCERE	4
 Capitolul I	
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPACTAREA PRIN VIBRARE A BETONULUI PROASPĂT. OBIECTIVELE TEZEI	5
I.1. Procesul de compactare prin vibrare	5
I.2. Influența factorilor reologici în procesul de compactare prin vibrare a betonului	8
I.3. Influența vibrațiilor asupra compactării betonului	10
I.3.1. Pragul de compactare și amplitudinea	10
I.3.2. Rigiditatea și vâscozitatea betonului	11
I.3.3. Frecvența și amplitudinea de vibrare	12
 Capitolul II	
MODELAREA REOLOGICĂ A BETONULUI PROASPĂT ÎN PROCESUL DE COMPACTARE DINAMICĂ	13
II.2. Modele reologice vâsco-elasto-plastice ale betonului proaspăt în procesul de compactare dinamică	13
II.2.1. Modele reologice simple	13
II.2.2. Modele reologice compuse	15
II.3. Structura și componentele betonului proaspăt	17
II.3.1. Agregate pentru beton	17
II.3.2. Ciment	17
II.3.3. Apa de amestec	17
II.3.4. Aditivi	18
II.3.5. Adaosuri	18
II.3.6. Caracteristicile betonului proaspăt. Factorii de influență	18
 Capitolul III	
ANALIZA DINAMICĂ A PARAMETRILOR DE VIBRARE ÎN PROCESUL DE COMPACTARE	18
III.1. Studiul mișcării vibratoarelor de interior	18
III.1.2. Dinamica sistemelor elastice acționate cu vibratoare de exterior	22
III.2. Studiul mișcării sistemului masă vibrantă-beton	23
III.3. Caracterizarea regimului de vibrații	25
III.4. Caracterizarea procesului ondulatoriu	25
III.4.1. Ecuația diferențială tridimensională	25
III.4.2. Ecuația unidimensională a unei plane	26
III.4.3. Ecuația unei cilindrice	26
III.4.4. Ecuația unei sferice	26
III.4.5. Ecuația de propagare cu disipare	27
 Capitolul IV	
DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DURATELOR DE VIBRARE PE CLASE DE BETON	27

IV.1. Materiale componente	27
IV.2. Metode de încercare pentru verificarea calității betonului	28
IV.3. Încercări necesare pentru verificarea calității agregatelor minerale (agregate naturale și/sau concasate)	29
IV.4. Încercări necesare pentru verificarea calității cimentului	29
IV.5. Determinarea duratei optime de vibrație de compactare dinamică	29
IV.6. Determinarea duratei optime de malaxare în raport cu durata optimă de vibrație	30
 Capitolul V	
 CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE	32
 V.1. Contribuții personale	34
V.2. Direcții viitoare de cercetare	34
 Bibliografie	35

Analiza dinamică
Beton proaspăt
Compactare dinamică
Vibrarea betonului
Vibratoare de interior
Vibratoare de exterior
Capacitate de rezistență a betonului

INTRODUCERE

Scopul prezentei teze constă în analiza legilor structurale și funcționale care stau la baza interacțiunii mașinilor vibratoare și a materialului compactat, fiind puse în evidență două caracteristici fundamentale ale sistemului vibrator: modelul dinamic cu disipare vâscoasă și gradul de compactare, îndeosebi densitatea de energie în mediul de compactare. Rezultatele obținute din analiza tipurilor de vibratoare și a modelelor reologice utilizate, sunt confirmate prin experimentele efectuate pe diferite tipuri de beton, care pun în evidență modul de transmitere a energiei de la sursă în masa betonului ca urmare a vibrațiilor de excitație întreținute, obținându-se compactarea betonului prin efectul de undă generată.

Drept urmare, se urmărește mărirea capacității de rezistență a elementelor din beton, realizate în procesul de compactare prin vibrare a betonului proaspăt pus în operă. În baza analizei tipurilor de vibratoare existente, se creează modele dinamice cu elemente vâscoase și elastice și se elaborează soluții de utilizare a diferitelor tipuri de vibratoare, care generează în diferite situații regimuri optime de vibrare, astfel încât să poată fi obținută o distribuție uniformă a porozității controlabile în beton, având drept scop creșterea rezistenței betonului după întărire la valori superioare soluțiilor actuale.

De asemenea, se studiază și se 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 și a elementelor prefabricate din beton.

Teza de doctorat este structurată în 5 capitole, desfășurate de 114 pagini, care conțin 40 figuri, 12 tabele, 18 anexe și 167 referințe bibliografice. În desfășurarea tezei se prezintă detaliat tema abordată și rezolvarea progresivă a acesteia, precum și concluziile, contribuțiile personale și modul de valorificare a rezultatelor obținute și direcțiile viitoare de cercetare.

Capitolul I cuprinde stadiul actual al cercetărilor privind compactarea prin vibrare a betonului proaspăt și obiectivele tezei. De asemenea în acest capitol este prezentată influența factorilor reologici asupra procesului de compactare a betonului.

În capitolul II sunt prezentate caracteristicile reologice ale betonului, structura și componentele acestuia. De asemenea sunt evidențiate modelele reologice vâsco-elasto-plastice ale betonului proaspăt în procesul de compactare prin vibrare, în care se prezintă răspunsul dinamic al betonului proaspăt prin aplicarea dinamică a sarcinii, respectiv regimul de vibrații, care determină modificări în structura betonului proaspăt și ale caracteristicilor sale reologice.

În capitolul III se prezintă o analiză dinamică a vibratoarelor de interior și de exterior. Tot în acest capitol se prezintă optimizarea compactării betonului proaspăt în vederea mării capacității de rezistență a acestuia, realizată printr-o corelație eficientă a caracteristicilor fizico-mecanice cu parametrii de vibrare (amplitudine, frecvență). Este prezentată caracteristica regimului de vibrații, a procesului ondulatoriu și ecuațiile de propagare a undelor generate de vibrații, inclusiv a undelor de propagare cu disipare.

În capitolul IV „determinări experimentale pentru stabilirea duratelor de vibrare pe clase de beton” sunt redată determinările experimentale pentru evaluarea răspunsului dinamic al betonului proaspăt în procesul de compactare, luând în considerație îndeosebi procesele de

malaxare și vibrare a betonului proaspăt, studiul respectiv fiind prezentat de la alegerea componentelor amestecului, la prepararea acestuia prin malaxare, turnarea și vibrarea betonului proaspăt, fiind caracterizate inclusiv mașinile și instalațiile de laborator utilizate.

În **capitolul V**, intitulat „Concluzii. Contribuții originale” sunt prezentate totalizările care pot fi evidențiate reieșind din rezultatele cercetărilor efectuate în cadrul elaborării respectivei teze de doctorat și contribuțiile personale ale autorului, referitor la parametrii de vibrare a betonului pentru mărirea capacității de rezistență, analiza teoretică și experimentală a parametrilor de vibrare și a mașinilor vibratoare din punct de vedere constructiv și funcțional, în vederea aplicării cu succes în practică.

Capitolul I

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPACTAREA PRIN VIBRARE A BETONULUI PROASPĂT. OBIECTIVELE TEZEI.

Betonul pentru structuri de rezistență în construcții civile, industriale și agricole, drumuri, poduri, datorită caracteristicilor sale fizico-mecanice, este materialul cu ponderea cea mai mare în tehnologiile de construcții.

Producerea, transportul și punerea în operă a betonului proaspăt sunt procese cu un grad ridicat de mecanizare, ceea ce duce la creșterea productivității, calității dar și a costurilor. Modul de punere în operă a betonului și mai ales gradul și regimul de compactare, au o mare influență asupra structurii sale.

Vibrarea betonului, fiind un procedeu simplu și eficient, este cel mai folosit mijloc de compactare a betonului, atât pe șantiere, cât și în fabrici de prefabricate.

Selectarea utilajelor corespunzătoare obținerii unei compactări eficiente, în condițiile unei productivități ridicate și a unui consum minim de energie, este o problemă dificilă pentru utilizatori.

Procedeele tehnologice de compactare prin vibrare a betonului necesită cunoașterea atât a caracteristicilor reologice ale betonului proaspăt, cât și a influenței parametrilor regimului dinamic vibratoriu asupra calității procesului de compactare.

I.1. PROCESUL 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, după cum urmează:

- componentele betonului (apă, ciment, agregate, aditivi);
- dozarea;
- amestecarea mecanică.

Comportarea betonului proaspăt, sub influența vibrațiilor mecanice, este determinată de agitația transmisă particulelor care are drept efect fluidificarea betonului, îmbunătățirea caracteristicilor de lucrabilitate, obținerea unui grad de compactare superior celui obținut prin simpla malaxare a betonului. La încetarea vibrării, betonul revine instantaneu la starea inițială, dar având un grad de compactare superior. Energia transmisă în masa betonului, permite obținerea unui grad de compactare ridicat chiar la mixturi cu tasare mai mică de 5cm, cu consistență vâscoasă, de pământ umed, aparent cu insuficiență de apă. În fig. I.1.1. sunt

indicate valorile volumului total de goluri, față de volumul de apă la betoane nevibrate, respectiv vibrate.

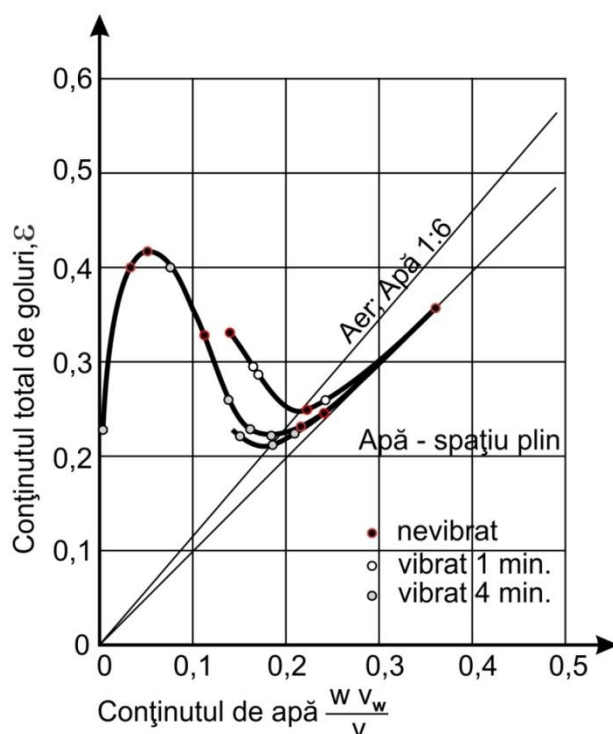


Fig. I.1.1. Variația volumului total de goluri față de volumul de apă [10]

Energia transmisă betonului prin vibrație favorizează reacțiile fizico-chimice de hidratare hidroliză ale cimentului, mărind forțele de legătură și aducînd constituenții în groapa de potențial.

Rezistențele betonului sunt influențate în mod direct de vibrație, respectiv de volumul de goluri din beton (fig. I.1.2).

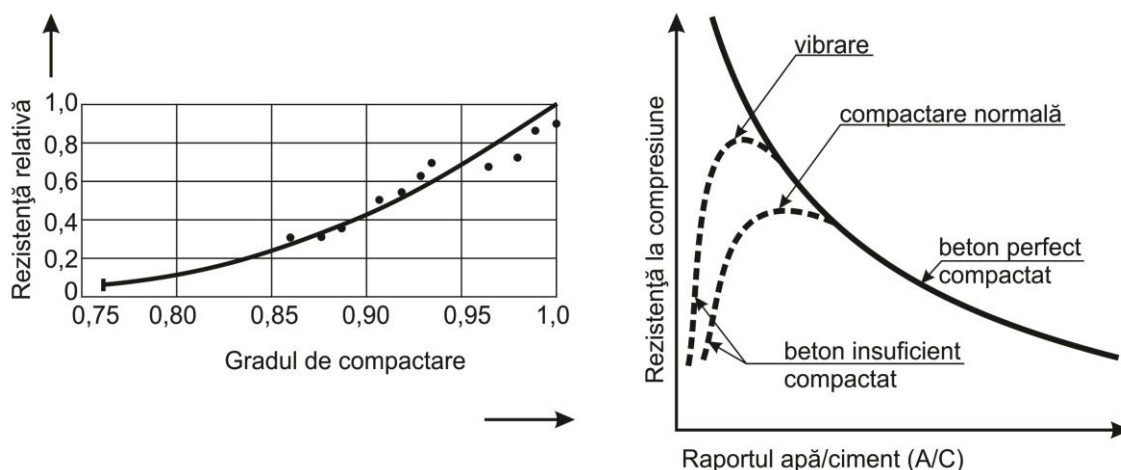


Fig. I.1.2 Variația rezistenței la compresiune a betonului, datorită vibrării [10]

Repetarea vibrării, după un interval de timp sau revibrarea, procedeu care a apărut din necesitatea de a asigura o monolitizare corespunzătoare a structurilor de beton turnate succesiv poate avea influențe pozitive (fig. I.1.3) dacă este aplicată în intervalul de timp corespunzător 1-2 ore. Creșterea rezistenței betonului prin revibrare poate fi explicată prin scăderea raportului a/c după prima vibrație.

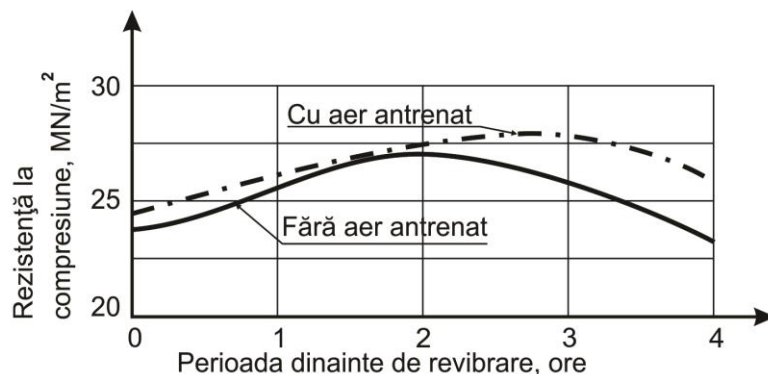


Fig. I.1.3 Variația rezistenței betonului la revibrare [10]

Se menționează faptul că o aplicare tardivă duce la distrugerea rețetelor de cristalizare coagulare și respectiv de condensare cristalizare ale cimentului, care spre deosebire de rețetele de coagulare sunt distruse definitiv, afectând negativ calitatea betonului.

Calitatea compactării este determinată de caracteristicile vibrogeneratorului, amplitudinea vibrațiilor, frecvența și mărimea forței perturbatoare.

Amplitudinea poate varia între o valoare minimă, la care nu se mai produce compactarea betonului și un maxim, care determină o agitație excesivă, numită fierberea sau supravibrarea betonului și care împiedică compactarea. Se poate ajunge la supravibrare.

Supravibrarea poate duce la stratificarea agregatelor după mărime sau segregarea, cu influență negativă asupra rezistenței betonului. Astfel, după vibrare întărirea betonului constă din două etape și anume:

- formarea scheletului de agregate prin împănare și crearea unei structuri stabile a betonului, ca urmare a realizării unui echilibru între forțele vâscoase, de frecare internă și de vibrare, 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 vibrare 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.

În faza tranzitorie, ce apare la începutul vibrației, crește energia internă a particulelor, apar 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, considerată **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 [10] 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 [10] 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.

I.2. INFLUENȚA FACTORILOR REOLOGICI ÎN PROCESUL DE COMPACTARE PRIN VIBRARE A BETONULUI

L.M. Krakinovskii [2] asimilează mișcarea particulelor amestecului vibrat cu mișcarea unui punct amplasat pe un plan înclinat față de orizontal sub un anumit unghi (fig. I.2.1.)

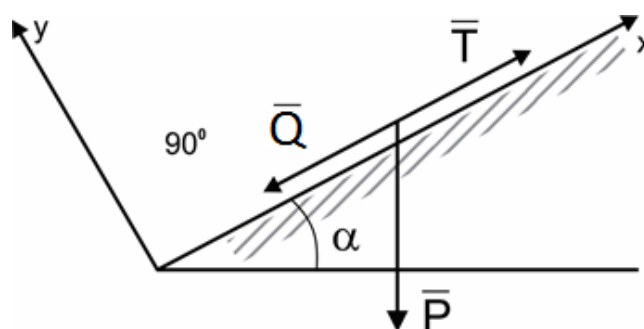


Fig. I.2.1. Mișcarea particulelor amestecului vibrat după L.M. Krakinovskii [2]

Mecanismul vibrocompactării, potrivit lui M. Alexander [3] 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 [7] consideră ca principale procesele 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 studiarea 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 funcție de punctul de vedere al cercetătorului asupra rolului unui tip sau altul de mișcare în amestec, studiul amestecului este abordat ca al unui mediu continuu sau ca al unui sistem de puncte materiale „fizice”.

Mecanismul compactării, conform lui L.P. Petrunkin [6], este apropiat de mecanismul compactării conform lui M. Alexander [3]. La vibrație, particulele amestecului se mișcă asemănător unui gaz. Existența mișcării relative a particulelor și intersectarea traiectoriilor lor

crează posibilitatea schimbului de impulsuri, a căror rezultantă statistică se opune presiunii exterioare, greutatei proprii și forțelor de aderență ale particulelor.

Mecanismul compactării, conform lui J. Kolek [8] are trei stadii: reșezarea componentelor, apropierea acestora și compactarea prin compresiune. Primele două stadii sunt valabile și pentru compactarea prin vibrare, ele coincidând în privința conținutului lor cu fazele corespunzătoare, conform teoriei lui A.E. Desov [5].

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)

Analizând 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:

$$\bar{T} = f\bar{N} + \bar{k}_0 \quad (1.2.5.)$$

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 vibrare 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 neglijată. 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.

I.3. INFLUENȚA VIBRAȚIILOR ASUPRA COMPACTĂRII BETONULUI

Parametrii principali de vibrare asupra compactării betonului sunt:

a) Parametrii definitorii de vibrocompactare a betonului:

- frecvența de vibrare: 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 vibrare;
- 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 vibrare;
- timpul de vibrare: ce se alege funcție de frecvența de vibrare 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 vibrării:

Acțiunile vibrării asupra sistemelor structurale pot fi împărțite în două faze:

- în prima fază cu durata T_s , se produce distrugerea legăturilor structurale și ca urmare, reducerea vâscozității;
- în a doua fază se produce deplasarea particulelor în concordanță cu acțiunea de vibrare externă în mediul cu vâscozitate redusă.

I.3.1. Pragul de compactare și amplitudinea

Condițiile la care particulele amestecului ce se compactează intră în mișcare, definesc pragul de compactare prin vibrare al respectivului amestec. Analizînd un punct material fizic al amestecului, amplasat conform fig. I.3.1. și supus în principiu aceluiași forțe, cu excepția forței greutății proprii, Φ , se observă că dacă $Q \geq T$, punctul material intră în mișcare sub acțiunea forței Φ , unde:

$$\Phi = P + zS(\gamma_c - \gamma_0) - P_a \quad (I.1.28.)$$

pentru P – greutatea punctului material;

P_a – forțele de menținere hidrostatică (forța lui Arhimede);

În procesul compactării, pragul de vibrocompactare se va modifica datorită modificării greutății specifice a amestecului, a înălțimii coloanei de amestec z , a forței lui Arhimede, P_a , a forțelor de aderență k_0 . Prin urmare, din condiția de mai sus rezultă că, compactarea este posibilă numai în cazul unei accelerații variabile în timp, adică în cazul unei frecvențe și unei amplitudini variabile în timp.

Deci pragul de compactare prin vibrare este determinat de:

- înălțimea amestecului;
- efortul limită de forfecare;
- raza componentelor amestecului

și variază în timpul compactării.

Amplitudinea variază între o valoare minimă, la care nu se mai produce compactarea și una maximă, care determină supravibrarea betonului, ceea ce duce la diminuarea rezistenței acestuia.

I.3.2. Rigiditatea și vâscozitatea betonului

Principalul factor care determină proprietățile elastice ale amestecului la vibrare, este considerat aerul neevacuat din amestec, întrucât are cea mai mare capacitate de deformare. Atunci rigiditatea amestecului de beton, cu considerarea greutății lui proprii, se determină cu ajutorul formulei:

$$C_0 = \frac{S_2(P_0 + P_{cm})(P_0 + P_{cm} + \gamma_a h_b)}{\varepsilon h_b P_0} \quad (1.1.45.)$$

unde: S_2 este suprafața de contact cu amestecul, a tiparului;

P_0 – presiunea atmosferică;

P_{cm} – presiunea statică, care se determină cu toate tipurile de sarcină suplimentară;

ε – porozitatea;

γ_a – greutatea specifică a amestecului;

h_b – înălțimea inițială a amestecului de beton.

Așadar, rigiditatea amestecului compactat în procesul vibrării va varia. Același lucru este valabil pentru frecvența proprie. Odată cu creșterea momentului sau frecvenței, sau a ambelor mărimi, va crește concomitent și rigiditatea. La fel se va întâmpla și cu frecvența proprie de bază. De aici rezultă necesitatea unui regim variabil de excitație exterioară.

Experimental s-a constatat că pe măsura compactării amestecului de beton, modulul său de elasticitate crește aproximativ de la 1 la 5 Mpa pentru oscilații verticale și de la 0,2 la 1,4 Mpa pentru oscilații orizontale.

Masa amestecurilor de beton vibrocompactate poate fi echivalată cu niște structuri solide tixotrope cu rezistență mică sau cu niște lichide structurate, tixotrope.

În cazul acțiunii de vibrare, cu parametri constanți, mediile ce se compactează dobândesc proprietăți de lichid newtonian (fig. I.3.1.). Acest fapt, confirmat în mod repetat de experiențe elementare, a fost confirmat științific prin curbele curgerii, construite pentru diferite materiale și diferiți parametri ai vibrării.

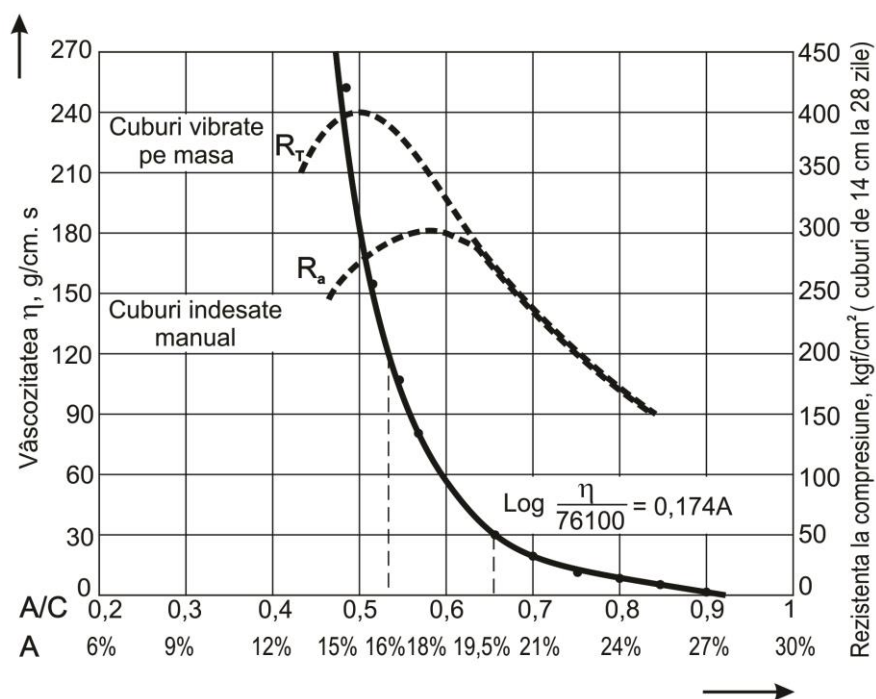


Fig. I.3.1. Vâscozitatea unui beton în stare de vibrare în funcție de cantitatea de apă de amestec [10]

Acțiunile vibrării asupra sistemelor structurale pot fi împărțite în două faze:

- în prima fază cu durata T_s , se produce distrugerea legăturilor structurale și ca urmare, reducerea vâscozității;
- în a doua fază se produce deplasarea particulelor în concordanță cu acțiunea de vibrare externă în mediul cu vâscozitate redusă.

Vâscozitatea amestecului la vibrare depinde de timpul de prelucrare prin vibrare, de proprietățile fizico-mecanice ale amestecului, de coordonatele punctelor mediului și de amplitudinea acțiunii de vibrare.

I.3.3. Frecvența și amplitudinea de vibrare

Variația frecvenței în procesul vibrării contribuie la optimizarea compactării amestecului, iar regimul cel mai bun pentru formarea produselor se obține la o frecvență variabilă, începînd de la cea joasă, când intensitatea vibrației va fi optimă pentru produsul dat.

De asemenea, rezistența betonului crește odată cu mărirea frecvenței la regimuri de compactare cu o accelerație a vibrațiilor cuprinsă între 20-35m/s². La frecvențe identice, rezistența betonului va fi cu 10-12% mai mare în cazul unor accelerații mai mari.

Deosebit de eficientă este atât vibrarea cu modulare treptată a frecvențelor, începînd de la cea mai joasă, trecîndu-se treptat la cele mai înalte frecvențe, cât și folosirea de frecvențe alternative. S-a stabilit experimental și că variația amplitudinii oscilațiilor platformei vibratoare, la frecvență constantă, permite o mai bună calitate a compactării produselor de beton, limita de rezistență crește cu 18-22%.

Teoretic se poate considera și un regim de lucru cu mai multe frecvențe și amplitudini diferite. Efectul regimului multifrecvențial simultan al procesului de vibrocompactare poate fi obținut însă practic prin combinarea vibrării, în regim constant de amplitudine-frecvență, cu percuția.

O altă soluție în mărirea numărului de frecvențe, constă în folosirea unei sarcini suplimentare generând o presiune statică de 0,004 – 0,006 Mpa aplicată pe suprafața betonului de compactat. Evident, frecvența de vibrare a acesteia va fi diferită de cea a oscilațiilor organului principal de lucru.

În concluzie, domeniul de variație al frecvenței și amplitudinii de compactare se alege în zona celui mai înalt grad de distrugere al legăturilor structurii amestecului de compactat sau în zona celei mai mari reduceri a vâscozității.

Capitolul II

MODELAREA REOLOGICĂ A BETONULUI PROASPĂT ÎN PROCESUL DE COMPACTARE DINAMICĂ

II.2. MODELE REOLOGICE VÂSCO-ELASTO-PLASTICE ALE BETONULUI PROASPĂT ÎN PROCESUL DE COMPACTARE DINAMICĂ

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

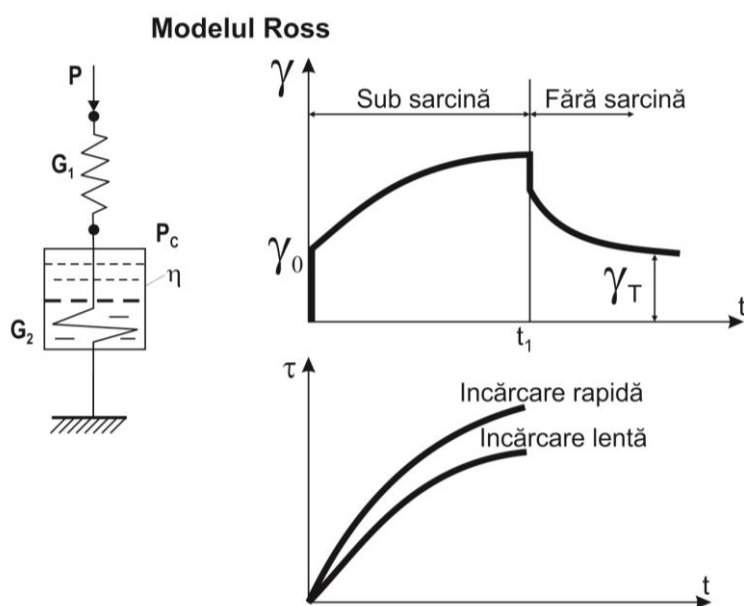


Fig. II.2.1. Modelul Ross [10]

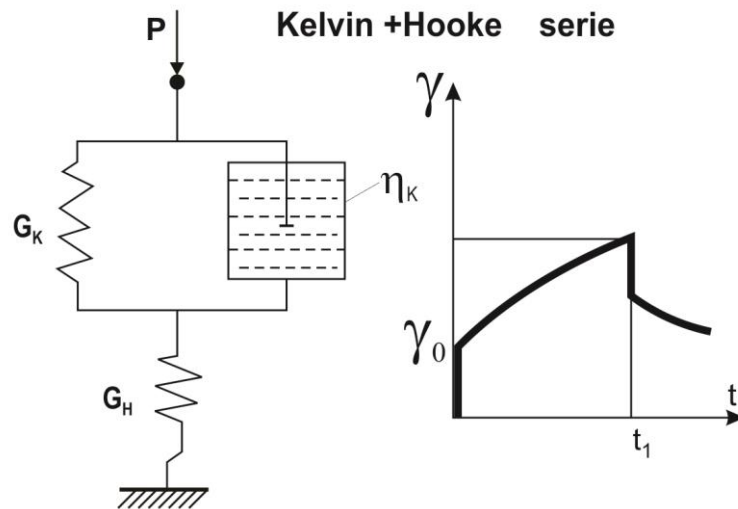


Fig. II.2.2. Modelul Kelvin+Hooke [10]

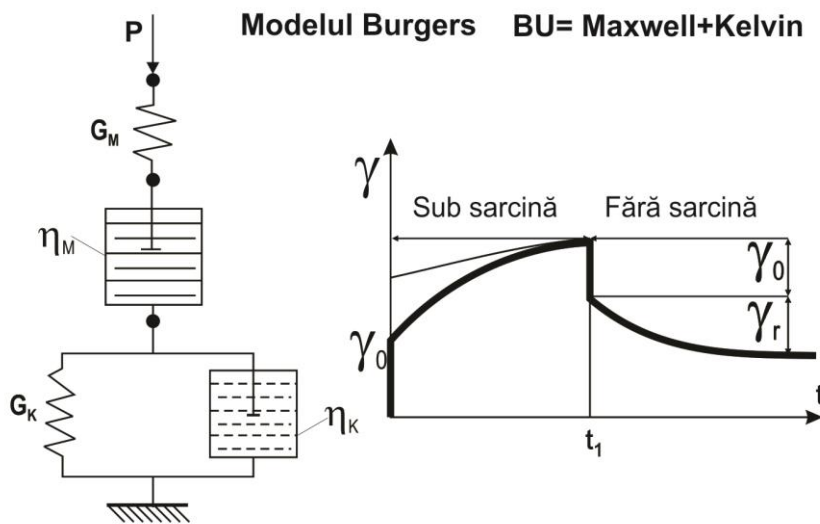


Fig. II.2.3. Modelul Burgers [10]

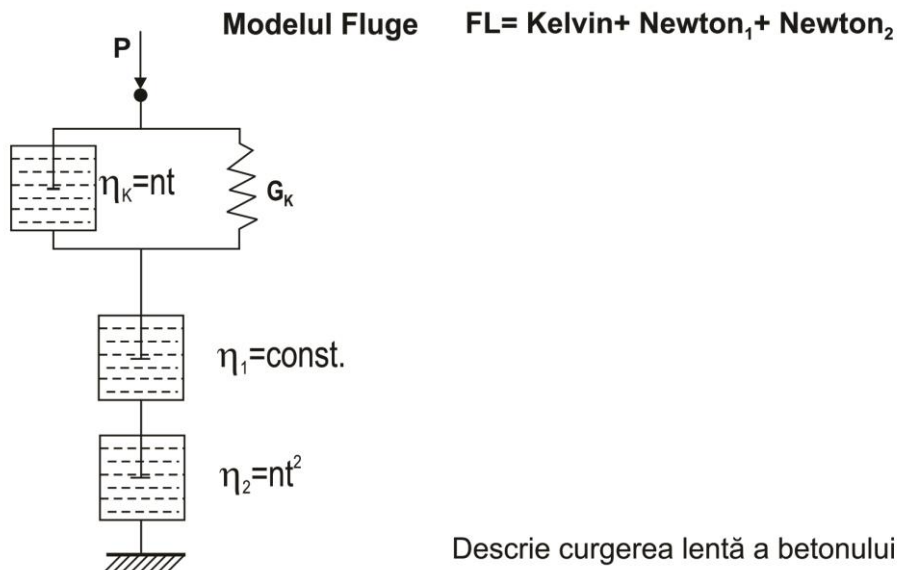


Fig. II.2.4. Modelul Fluge [10]

II.2.2. Modele reologice compuse

Modelele compuse, formate din mai multe modele simple și care descriu mai bine 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 Ulițkii, care ține cont de deformațiile elastice și plastice ale constituenților betonului.

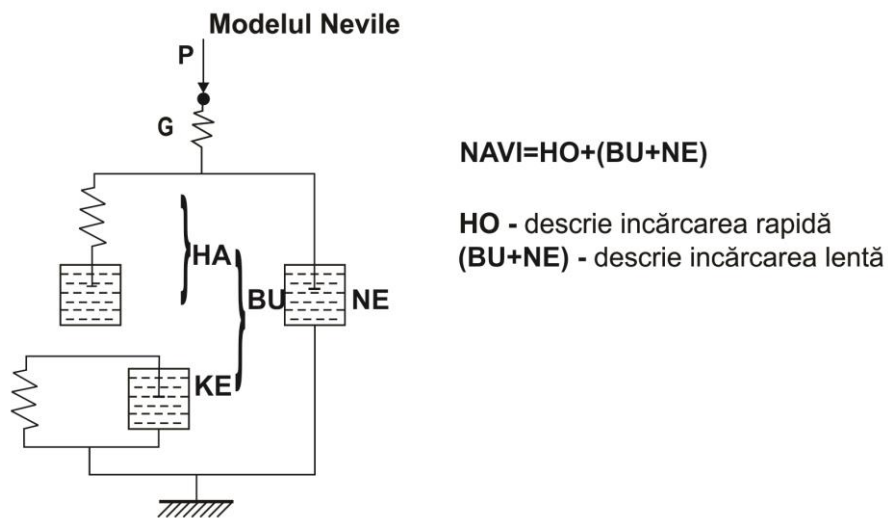


Fig. II.2.5. Modelul Neville [10]

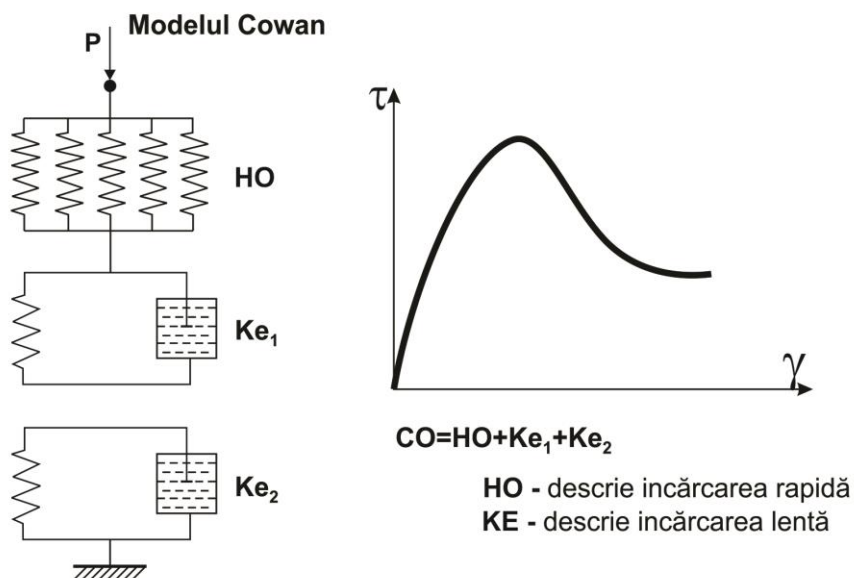


Fig. II.2.6. Modelul Cowan [10]

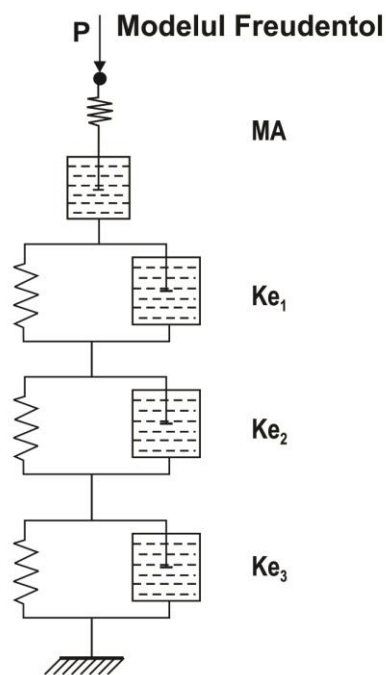


Fig. II.2.7. Modelul Freudentol [10]

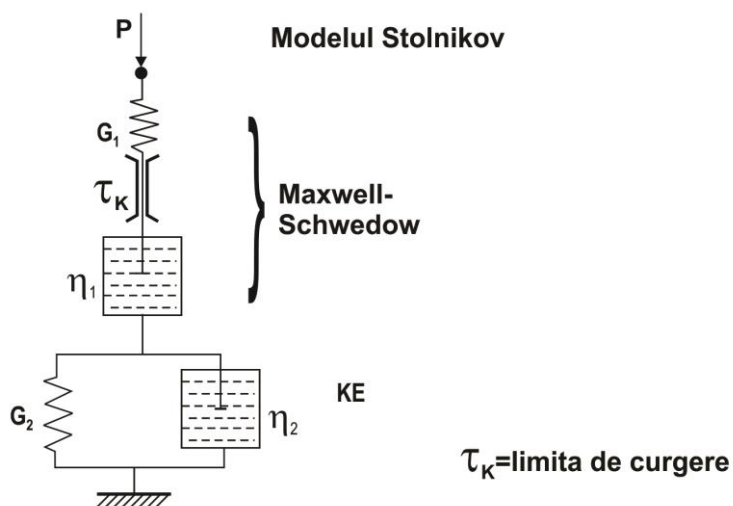


Fig. II.2.8. Modelul Stolnikov [10]



Fig. II.2.9. Modelul Ulițkii [10]

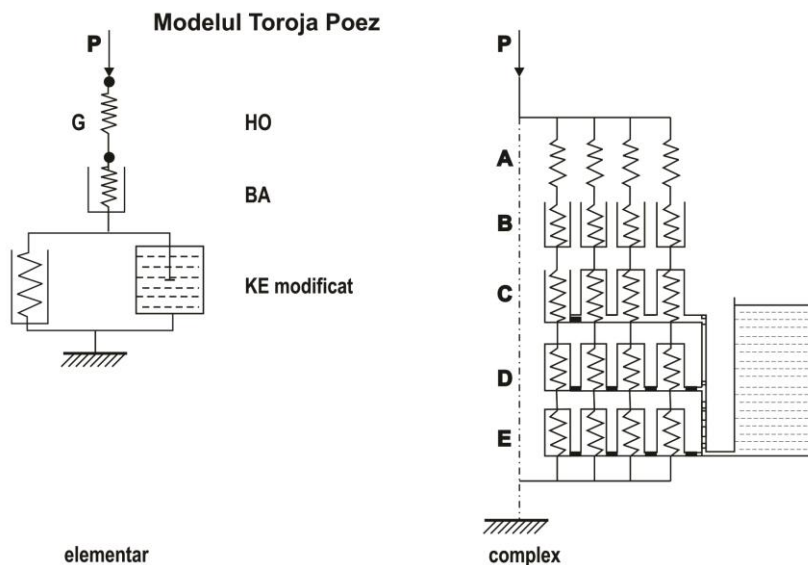


Fig. II.2.10. Modelul Toroja Poez [10]

II.3. STRUCTURA ȘI COMPONENTELE BETONULUI PROASPĂT

Materialele componente 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 [140], la producerea betoanelor trebuie utilizate doar materiale componente în corespundere cu cerințele specifice stabilite.

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

II.3.1. Agregate pentru beton

Agregatele naturale pot fi de balastieră și/sau carieră, sortate și/sau concasate. Acestea trebuie să respecte standardul de produs [142] și să aibă anumite caracteristici impuse de normele în vigoare de preparare a betonului [140] și [141].

II.3.2. Ciment

Cerințele de bază pentru utilizarea cimenturilor la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu cerințele impuse de [140], dar care trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conform cu [153].

II.3.3. Apa de amestec

Cerințele de bază pentru utilizarea apei la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu cerințele impuse de [140] și care arată că aptitudinea generală de utilizare este stabilită pentru apa de amestec și apele de spălare recuperate de la producția betonului, conform [158].

II.3.4. Aditivi

Cerințele de bază pentru utilizarea aditivilor la obținerea betoanelor sunt în conformitate cu [140]. Aditivi utilizați trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conform SR EN 934-2+A1.

II.3.5. Adaosuri

Aptitudinea generală de utilizare a adaosurilor minerale pulverulente (filere minerale și pigmenți) este în conformitate cu [140]. Adaosurile utilizate trebuie să îndeplinească condițiile și să fie conforme SR EN 450-1, SR EN 450-2, SR EN 13263-1+A1 și SR EN 13263-2+A1.

II.3.6. 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.

Capitolul III**ANALIZA DINAMICĂ A PARAMETRILOR DE VIBRARE ÎN PROCESUL DE COMPACTARE****III.1. STUDIUL MIȘCĂRII VIBRATOARELOR DE INTERIOR**

Cele mai răspândite soluții constructive ale vibratoarelor de interior [1] se bazează pe generarea unei forțe perturbatoare rotitoare care intersectează radial corpul cilindric al vibratorului.

Deoarece mișcarea vibratorului este caracterizată prin traiectorii circulare, mișcarea oscilatorie a corpului vibratorului se transmite betonului pe toate direcțiile radiale în planuri paralele orizontale.

Fenomenul de propagare a undelor generate în betonul proaspăt este caracterizat prin realizarea de unde plane, cilindrice sau sferice.

Ca urmare, pentru o apreciere globală a propagării energiei de la sursă la o distanță oarecare x se explică astfel:

- pentru unde plane, $a = a_0 e^{-\beta x}$;
- pentru unde cilindrice, $a = a_0 e^{-\beta x} \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + r_x}}$;
- pentru unde sferice, $a = a_0 e^{-\beta x} \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + r_x}}$;

unde: a_0 – amplitudinea sursei de generare a undei; r_0 – raza buteliei vibratorului; β – coeficientul de amortizare a efectului de undă în masa de beton; x – distanța de la sursă pînă în punctul de analiză a efectului de undă.

Prima ipoteză de calcul ce se referă la faptul că vectorii tuturor forțelor aplicate la corp în același plan cu centrul de masă al corpului vibratorului [1], ce efectuează o mișcare plan paralelă, într-un sistem în care elementele elastice lipsesc (fig.III.1.1), au următoarele amplitudini:

$$x_a = \frac{m_0 r \omega}{(m_1 + m_0) \sqrt{\omega^2 + 4h_x^2}}; \quad y_a = \frac{m_0 r \omega}{(m_1 + m_0) \sqrt{\omega^2 + 4h_y^2}} \quad (\text{III.1.1})$$

iar defazajul dintre forță și deplasare este, respectiv,

$$\varphi_x = \arctg\left(\frac{-2h_x}{\omega}\right); \quad \varphi_y = \arctg\left(\frac{-2h_y}{\omega}\right) \quad (\text{III.1.2})$$

Deoarece problema este axial simetrică, ecuațiile de mișcare pot fi condensate pe baza utilizării sistemului polar de coordonate (fig.III.1.2).

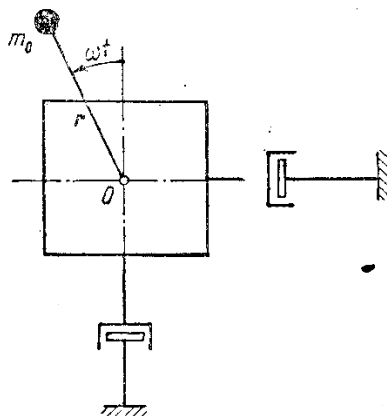


Fig. III.1.1. Model de calcul fără elemente elastice [1]

A doua ipoteză de calcul [1] se bazează pe faptul că locul de prindere a vibratorului la maneta de manipulare trebuie să aibă o deplasare mult diminuată, practic să fie nul.

Pentru a obține punctul de nul este necesar ca centrul masei excentrice să fie plasat sub centrul de masă al corpului vibratorului. În acest caz, mișcarea corpului vibratorului poate fi studiată cu ajutorul a patru grade de libertate, conform schemei din figura III.1.3.

În punctul A se consideră centrul de masă al axcentricului, iar în A' – proiecția punctului A pe axa $u - u'$.

Rezultanta forțelor de rezistență din partea betonului se consideră a fi aplicată în punctul D, iar centrul de masă al vibratorului împreună cu masa de beton participantă la mișcarea vibrantă se află în punctul G.

Notăm cu $n = EA'$ distanța de la proiecția centrului de masă a întregului vibrator pînă la centrul masei excentrice; $n' = ED$ distanța de la proiecția centrului de masă a întregului vibrator pînă la punctul de aplicare a forței disipative; $n'' = EG$ distanța de la proiecția centrului de masă a întregului vibrator pînă la centrul de masă al corpului.

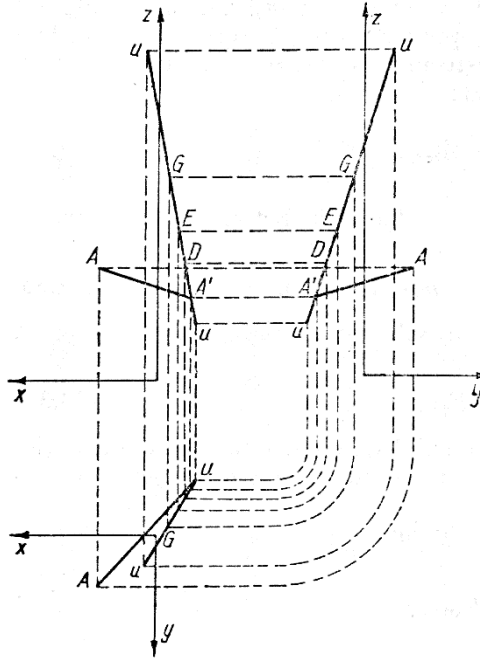


Fig. III.1.3. Schema poziției unui vibrator la un anumit moment [1]

Pentru a simplifica calculele, fără a greși prea mult, se consideră că în punctul E se află centrul întregului vibrator, caz în care ecuațiile diferențiale de mișcare a vibratorului sunt:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_o + m')\ddot{x} + b(\dot{x} + n'\dot{\psi}) &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \\ J_1 \ddot{\psi} + b n'(\dot{x} + n'\dot{\psi}) &= m_0 r \omega^2 n \cos \omega t \\ (m_1 + m_o + m')\ddot{y} + b(\dot{y} + n'\dot{\varepsilon}) &= m_0 r \omega^2 \sin \omega t \\ J_1 \ddot{\varepsilon} + b n'(\dot{y} + n'\dot{\varepsilon}) &= m_0 r \omega^2 n \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{III.1.9})$$

unde J_1 - este momentul central de inerție al întregului vibrator față de o axă orizontală, perpendiculară pe axa $u-u$, ce trece prin centrul de masă; x, y - coordonatele punctului E ; ψ, ε - unghiul dintre axa Oz și proiecțiile axei $u-u$ pe planurile Oxz și Ozy .

Ecuațiile diferențiale pot fi separate, deoarece mișcărilor sînt decuplate, primele două și ultimile două.

Se observă că partea stîngă a ecuațiilor prima și a treia, respectiv a doua și a patra sînt analoge. Părțile diferă doar printr-o fază $\pi/2$, corespunzătoare axelor Ox și Oy . Din aceste motive vor fi analizați doar primele două ecuații, luînd în considerație faptul că:

$$x = a\psi \quad (\text{III.1.10})$$

unde a este distanța de la punctul de masă a întregului.

În acest caz, primele două ecuații diferențiale obțin forma:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_o + m')\ddot{x} + b\left(1 + \frac{n'}{a}\right)\ddot{x} &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \\ \left(\frac{J_1}{na}\ddot{x} + b\frac{n'}{n}\left(1 + \frac{n'}{a}\right)\ddot{x}\right) &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \quad (\text{III.1.11})$$

Deoarece partea dreaptă este identică, pentru a avea aceleași soluții, trebuie să existe egalitate între coeficienții morimilor \dot{x} și \ddot{x} , astfel:

$$n' = n;$$

$$a = \frac{J_1}{(m_1 + m_0 + m')n} \quad (\text{III.1.12})$$

Distanța de la punctul de nul față de planul transversal în care se află centrul de masă al excentricului este:

$$l = \frac{J}{(m_1 + m_0 + m')a}, \quad (\text{III.1.13})$$

unde $l = n + a$, iar $J = J_1 + (m_1 + m_0 + m')a^2$ este momentul de inerție față de axa orizontală ce trece prin punctul de nul și este perpendiculară pe axa $u - u$.

Considerînd că $n' + a = l$, avem:

$$(m_1 + m_0 + m')\ddot{x} + b\frac{l}{a}\dot{x} = m_0 r \omega^2 \cos \omega t,$$

cu soluția

$$x = x_a \cos(\omega t - \varphi),$$

unde defazajul φ și amplitudinea x_a sînt date de ecuațiile:

$$\text{tg } \varphi = -\frac{bl}{a(m_1 + m_0 + m')\omega}; \quad (\text{III.1.14})$$

$$x_a = \frac{m_0 r \omega a}{\sqrt{a^2(m_1 + m_0 + m')^2 \omega^2 + l^2 b^2}}$$

Dacă există punctul de nul, cazul vibratorului în aer, atunci axa vibratorului va descrie un con circular cu vîrfurile în acest punct.

Dacă punctul de nul nu se realizează, cazul vibratorului în beton, atunci axa de simetrie a vibratorului descrie o suprafață hiperboloidă (fig. III.1.4).

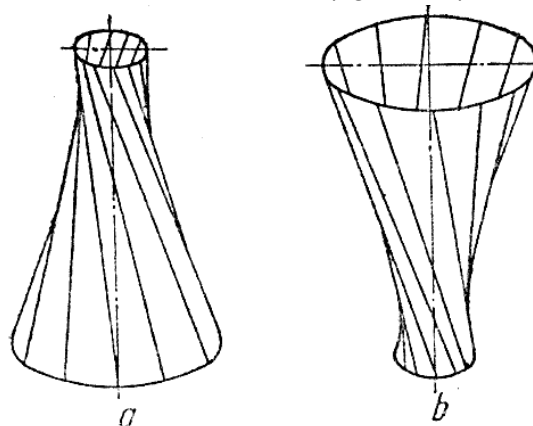


Fig. III.1.4. Pozițiile succesive ale axei de simetrie a corpului vibratorului în timpul funcționării [1]

Pentru corelația parametrilor constructivi și funcționali, se recomandă utilizarea următoarei formule:

$$f = 80 \left(1 + \frac{100}{d} \right) [\text{Hz}] \quad (\text{III.1.15})$$

unde d este diametrul corpului vibratorului, în mm.

Amplitudinea vibrațiilor se recomandă la valorile 0,5...0,7 mm pentru frecvența mai mică sau egală cu 200 Hz, iar de 0,3...0,5 mm, pentru frecvențe cuprinse în intervalul

200...250 Hz. În vederea evitării segregării betonului, se recomandă evitarea amplitudinilor de peste 1,2...1,3 mm.

III.1.2. Dinamica sistemelor elastice acționate cu vibratoare de exterior

Vibratoarele de exterior [1] sînt plasate pe cofraje, tipare sau elemente din această categorie, care interacționează cu masa de beton proaspăt pus în operă.

Pentru a obține un efect maxim de compactare și o omogenizare cît mai mare a masei de beton, trebuie ca regimul de vibrații transmis betonului să fie stabil, controlabil și la parametrii impuși de tehnologia de lucru.

Pentru calculul parametrilor constructivi și funcționali ai vibratoarelor de exterior cu forță perturbatoare inerțială, se introduc mai multe ipoteze simplificatoare și anume:

- sistemul vibrator – element de prindere se consideră modelat ca un sistem cu un grad de libertate;
- vibratorul este plasat în centrul de greutate al elementului elastic ce îndeplinește rolul de tipar, cofraj etc.

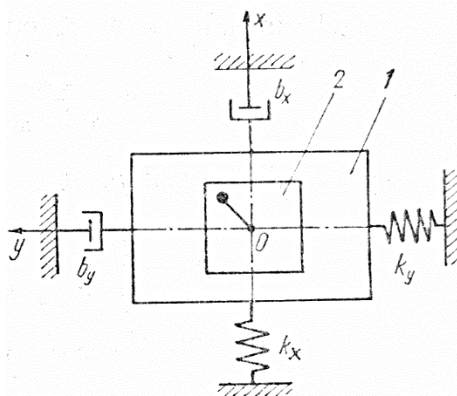


Fig. III.1.5. Modelul dinamic de calcul al unui sistem elastic compus din vibrator de exterior cu forță perturbatoare rotitoare și cofraj [1]

Ecuțiile diferențiale de mișcare ale sistemului elastic (fig. III.1.5), excitat cu o forță perturbatoare rotitoare, sînt de forma:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_0)\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \\ (m_1 + m_0)\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y &= m_0 r \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{III.1.16})$$

unde m_0 este masa totală a excentricului; r – distanța de la centrul de masă a excentricului pînă la axa de rotație numită și excentricitate; ω - viteza unghiulară a masei excentrice și pulsația forței perturbatoare; k_x, k_y – coeficienții de rigiditate echivalenți ai sistemului elastic, corespunzători direcțiilor x și, respectiv y ; b_x, b_y – coeficienții echivalenți ai forțelor de disipare proporționale cu vitezele \dot{x} și respectiv \dot{y} .

Pentru modelul dinamic din figura III.1.6, care ține seama că forțele elastice, de rezistență și perturbatoare sînt concurente în centrul de masă al sistemului elastic, ecuațiile diferențiale de mișcare se scriu sub forma:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_0)\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x &= m_0 r \omega^2 \cos \alpha \cos \omega t \\ (m_1 + m_0)\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y &= m_0 r \omega^2 \sin \alpha \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{III.1.21})$$

Soluțiile ecuațiilor (III.1.13), ce exprimă regimul stabilizat al vibrațiilor forțate, sînt:

$$x = x_a \cos(\omega_t - \varphi_x), \quad y = y_a \sin(\omega_t - \varphi_y), \quad (\text{III.1.22})$$

Amplitudinile corespunzătoare deplasărilor după axa Ox și respectiv Oy sînt de forma:

$$x_a = \frac{m_0 r \omega^2 \cos \alpha}{(m_1 + m_0) \sqrt{(p_x^2 - \omega^2)^2 + 4h_x^2 \omega^2}} \quad (III.1.23)$$

$$y_a = \frac{m_0 r \omega^2 \sin \alpha}{(m_1 + m_0) \sqrt{(p_y^2 - \omega^2)^2 + 4h_y^2 \omega^2}}$$

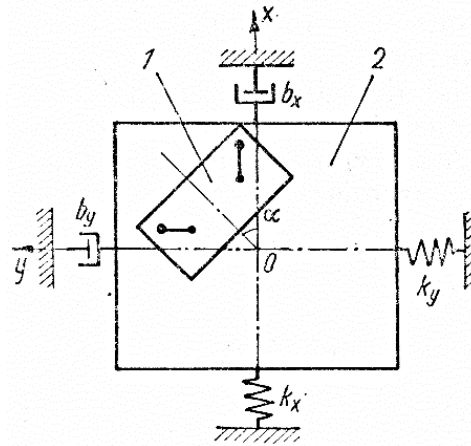


Fig. III.1.6. Modelul dinamic de clacul al unui sistem elastic compus din vibrator de exterior cu forță perturbatoare unidirecțională și cofraj [1]

III.2. STUDIUL MIȘCĂRII SISTEMULUI MASĂ VIBRANTĂ-BETON

Modelul dinamic este prezentat în figura III.2.1 și se caracterizează prin faptul că între masa betonului și platforma vibratoare legătură adoptată este de tip vâsco-liniar cu coeficientul c , adică forța vâscoasă de legătură este de forma $Q(t) = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$.

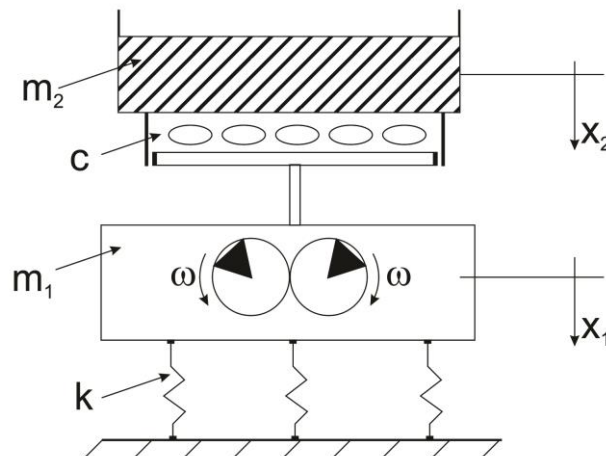


Fig. III.2.1. Model dinamic [10; 12]

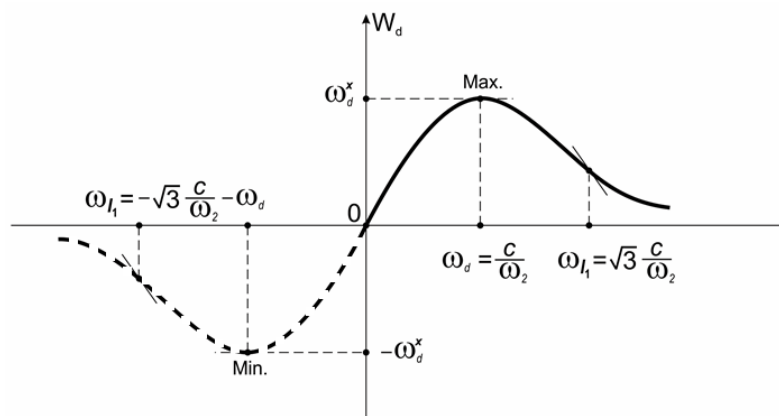


Fig. III.2.2. Curba $W_d-\omega$ [10; 12]

În figura III.2.3 sunt prezentate curbele de energie disipativă pentru trei variante distincte ale lui c și pulsație $\omega=314$ rad/s.

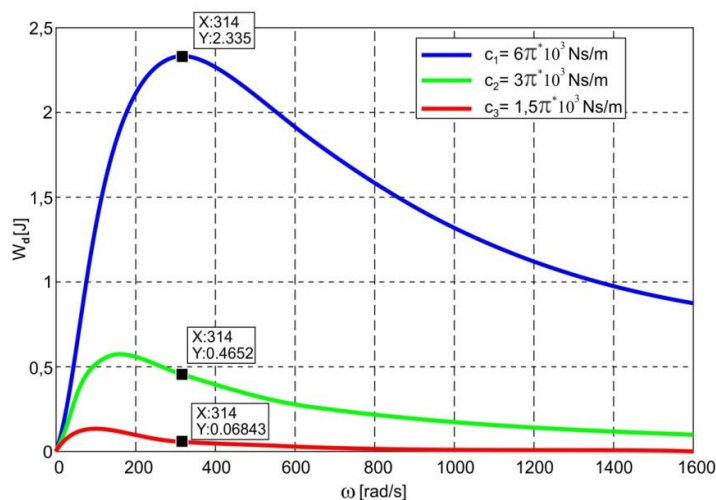


Fig. III.2.3. Curbele de energie disipativă [12]

Astfel, în figura III.2.4 se prezintă curbele histerezis sub forma de elipse pentru trei valori distincte ale lui c și pulsație $\omega=314$ rad/s.

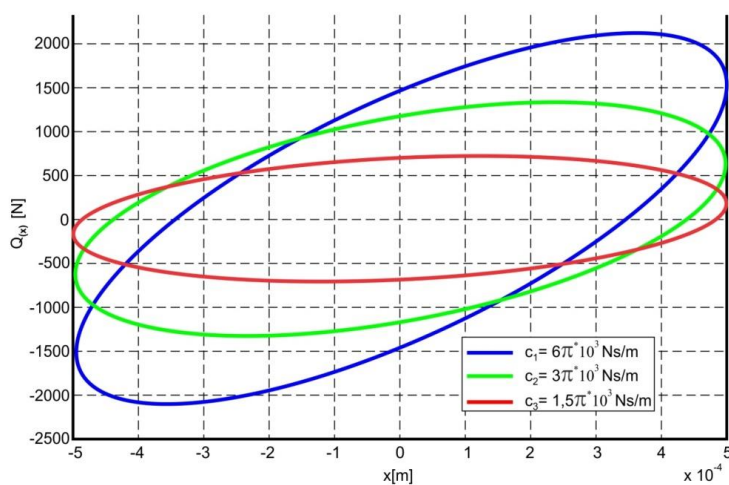


Fig. III.2.4. Curbe histerezis sub formă de elipse [12]

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 vibrare 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 vibrare A_1 , ω și de masa m_2 și constanta de amortizare c a betonului proaspăt.

III.3. CARACTERIZAREA REGIMULUI DE VIBRAȚII

Propagarea vibrațiilor în beton

Din studiul dinamicii sistemului vibrator beton [10] rezultă că betonul supus vibrațiilor suferă modificări importante trecînd din fază solidă în aceea de fluid vâscos, energia transmisă prin vibrații ridicînd energia internă și mobilitatea agregatelor betonului.

După trecerea de faza tranzitorie funcționarea sistemului vibrator beton se stabilizează la o funcționare de regim cu parametrii cvasiconstanți și rămîne astfel atîta timp cît funcționează vibrogeneratorul, care transmite energia de mișcare betonului.

Transmiterea energiei de la sursă în regiunea mediului care se găsește în stare de vibrație numită și câmp de vibrație are loc sub formă de unde.

Propagarea undelor se face cu atenuare pînă la o limită la care energia transmisă este insuficientă pentru a determina modificările în structura betonului.

Perturbația produsă de undă într-un punct din câmpul de vibrații produce o compresiune urmată după un anumit interval de timp de o depresiune, transmiterea undei traducîndu-se printr-o variație a presiunii în punctul considerat.

Presiunea instantanee a undei cuprinde presiunea totală la un moment dat în punctul considerat, din care se scade presiunea strictă în acel punct.

III.4. CARACTERIZAREA PROCESULUI ONDULATORIU

Procesul ondulatoriu se caracterizează prin ecuațiile diferențiale ale undelor [10].

III.4.1. Ecuația diferențială tridimensională

Conform legii fundamentale a dinamicii lui Newton, luînd în considerare forțele ce acționează pe elementul de volum (fig. III.4.1) după axa Ox .

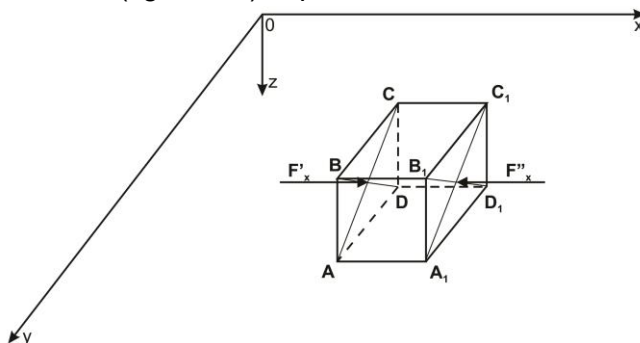


Fig. III.4.1. Schema forțelor pe elementul de volum [10]

Expresia ecuației diferențiale a undelor se mai poate scrie și sub o altă formă având în vedere că propagarea undei este o mișcare rotațională. Dacă vectorul vârtej este totdeauna nul în toate punctele mediului, atunci mișcările fiecărui punct i se poate asocia o funcție:

$$\phi = \phi(x, y, z, t) \quad (\text{III.4.20})$$

numită potențial de viteze, astfel încât

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}; v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}; v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{III.4.21})$$

III.4.2 Ecuația unidimensională a undei plane

Considerând 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.4.26) devine:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (\text{III.4.27})$$

III.4.3 Ecuația undei cilindrice

Considerând sistemul de axe cilindrice și elementul de volum dV (fig. III.4.3.), 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.4.26) devine:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (\text{III.4.47})$$

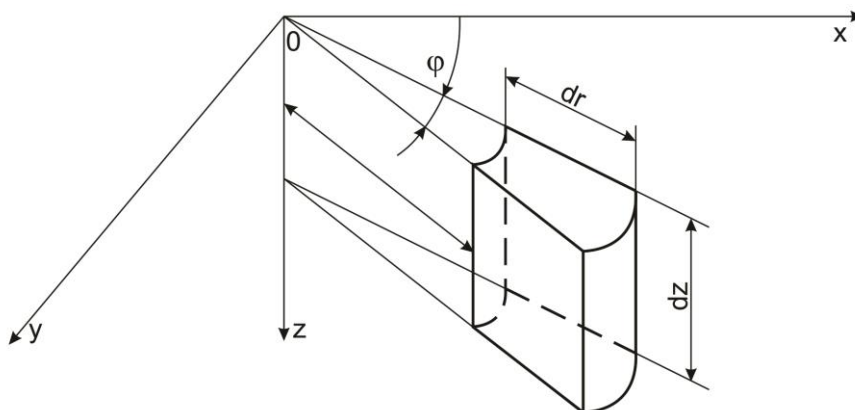


Fig. III.4.3. Elementul de volum în coordonate cilindrice [10]

III.4.4. Ecuația undei sferice

Considerând sistemul de axe sferice și elementul de volum dV (fig III.4.4), precum și ecuațiile:

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

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

$$z = r \cos \theta$$

$$(\text{III.4.56})$$

unde: θ – unghiul polar

φ – azimutul

laplacianul ia forma:

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

respectiv ecuația tridimensională a undei sferice este:

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

III.4.5. 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 η , astfel:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \eta v \quad (III.4.68)$$

Presiunea creată de unda progresivă este dată de relația:

$$p_A = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} = \rho_0 c^2 (\alpha + i\beta) A_1 e^{i\omega t} e^{-(\alpha+i\beta)x} \quad (III.4.78)$$

iar viteza particulei în procesul ondulatoriu rezultă sub forma:

$$v_x = \frac{\partial \xi}{\partial t} = i\omega A_1 e^{i\omega t} e^{-(\alpha+i\beta)x} \quad (III.4.79)$$

Se constată că parametrii de propagare a undei depinde de ω , A_1 și β .

Capitolul IV

DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DURATELOR DE VIBRARE PE CLASE DE BETON

IV.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 [150], inclusiv consistența, masa volumetrică, rezistența, durabilitatea protecția contra coroziunii a pieselor din oțel înglobate, 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 de 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.

IV.1.1. 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.

IV.1.2. Utilizarea 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;
- caracteristicile mediului înconjurător la care va fi supus betonul;
- toate cerințele pentru agregate aparente sau agregatele pentru betonul decorativ.

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

IV.1.3. Utilizarea aditivilor

Cantitatea totală de aditivi eventual utilizați nu trebuie să depășească dozajul maxim recomandat de către 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.

Aditivii utilizați în cantitate inferioară la 2g/kg ciment nu sunt admiși decât dispersați într-o parte din apa de amestec.

IV.1.4. 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.

IV.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 IV.2.1;
- determinarea tasării – Anexa IV.2.2

Beton întărit:

- determinarea densității betonului întărit – Anexa IV.2.3;
- determinarea rezistenței la compresiune – Anexa IV.2.4;
- determinarea rezistenței la întindere prin despicare – Anexa IV.2.5;
- determinarea adâncimii de pătrundere a apei sub presiune – Anexa IV.2.6.

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

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

IV.4. ÎNCERCĂRI NECESARE PENTRU VERIFICAREA CALITĂȚII CIMENTULUI:

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

IV.5. DETERMINAREA DURATEI OPTIME DE VIBRARE DE COMPACTARE DINAMICĂ

Determinarea duratei optime de vibrare de compactare dinamică pe două clase de beton și anume C30/37 și C45/55.

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 figura IV.5.1 se pot observa punctele de minim și de maxim ale curbei, implicit se observă durata optimă de vibrare și rezistența la compresiune pentru fiecare clasă de beton în parte.

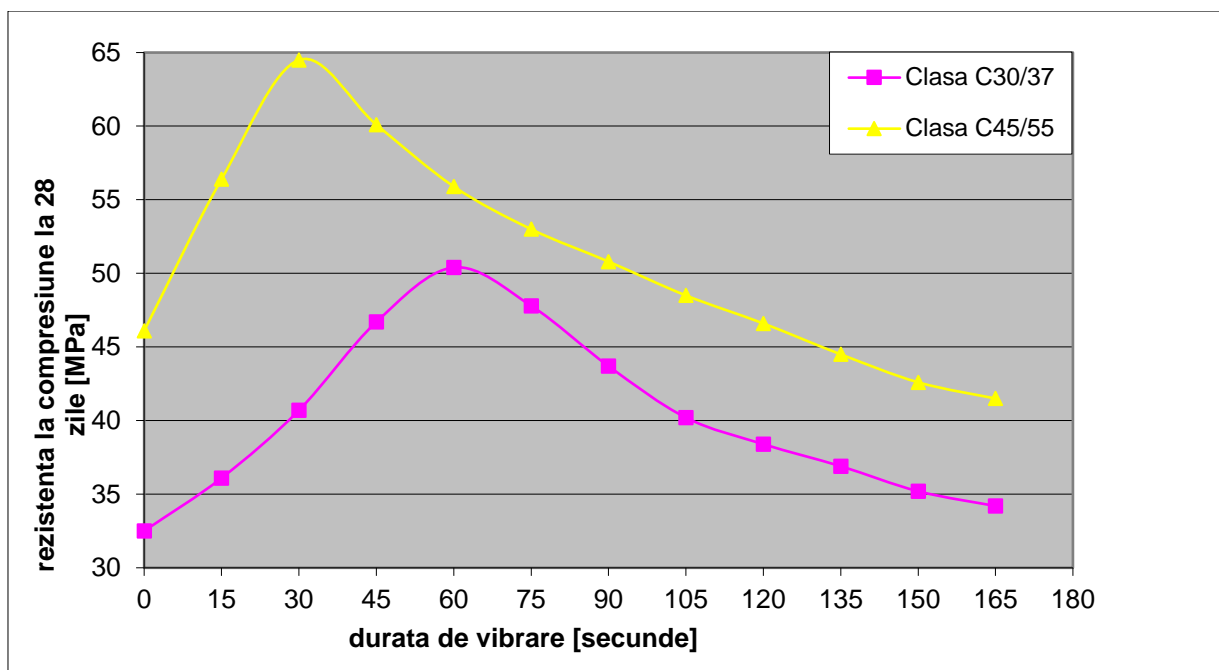


Fig. IV.5.1. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 28 zile pe cuburile de beton

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.

IV.6. DETERMINAREA DURATEI OPTIME DE MALAXARE ÎN RAPORT 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 IV.6.1, IV.6.2 și IV.6.3 se pot observa punctele de minim și de maxim ale curbei, implicit se observă durata optimă de malaxare pentru fiecare clasă în parte.

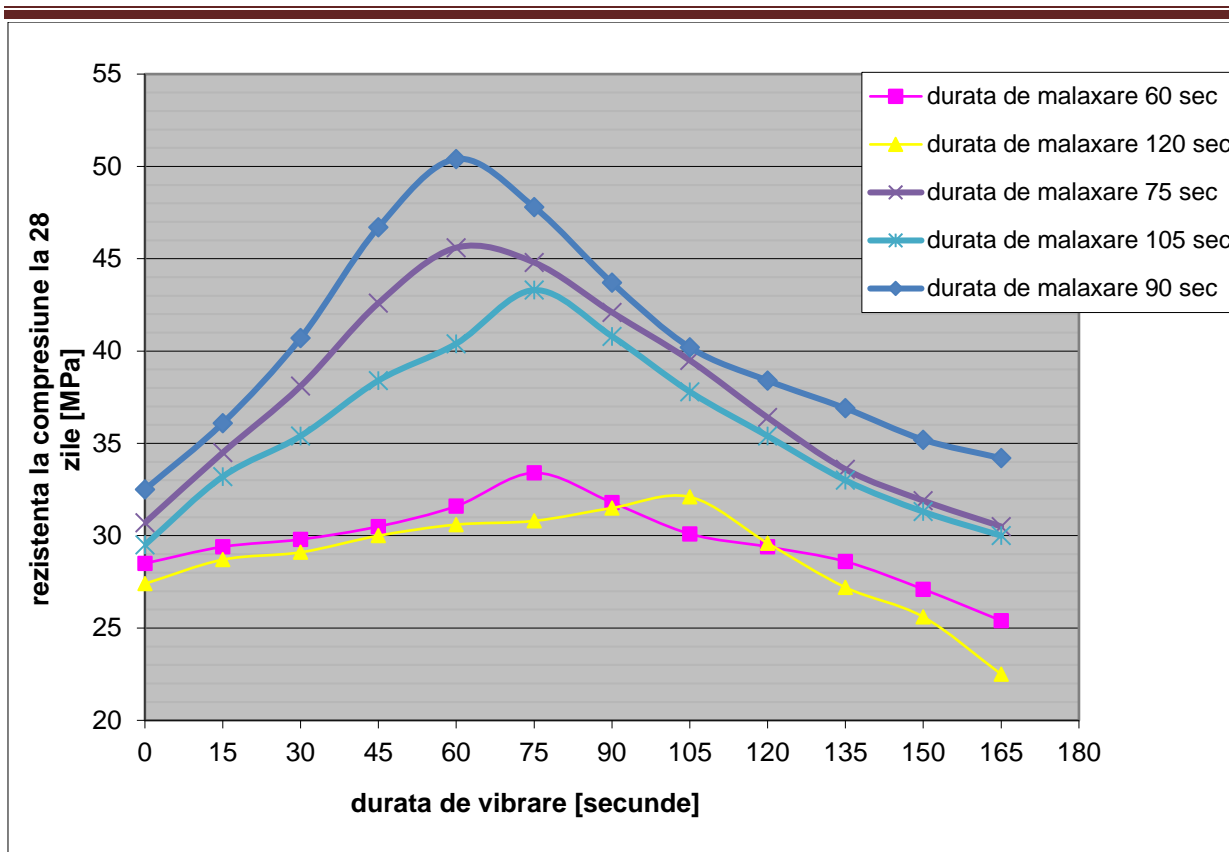


Fig. IV.6.1. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 28 zile pe cuburile de beton C30/37

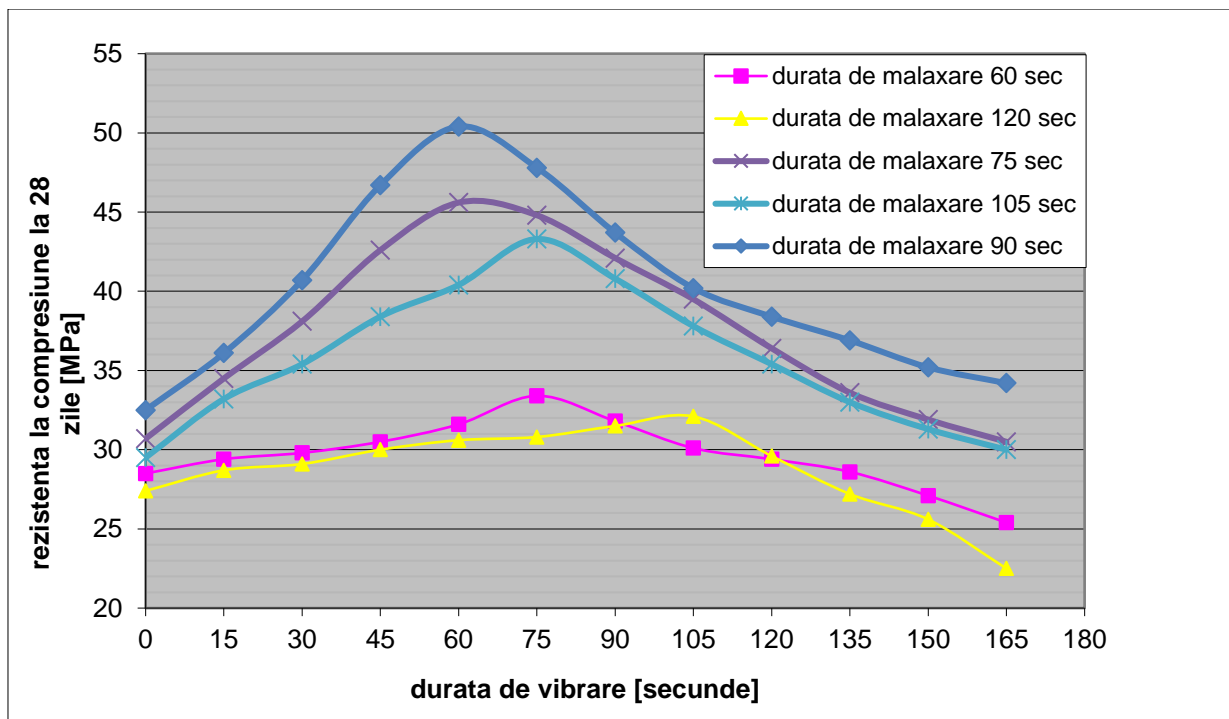


Fig. IV.6.2. Reprezentarea grafică a rezistențelor la compresiune la 28 zile pe cuburile de beton C45/55

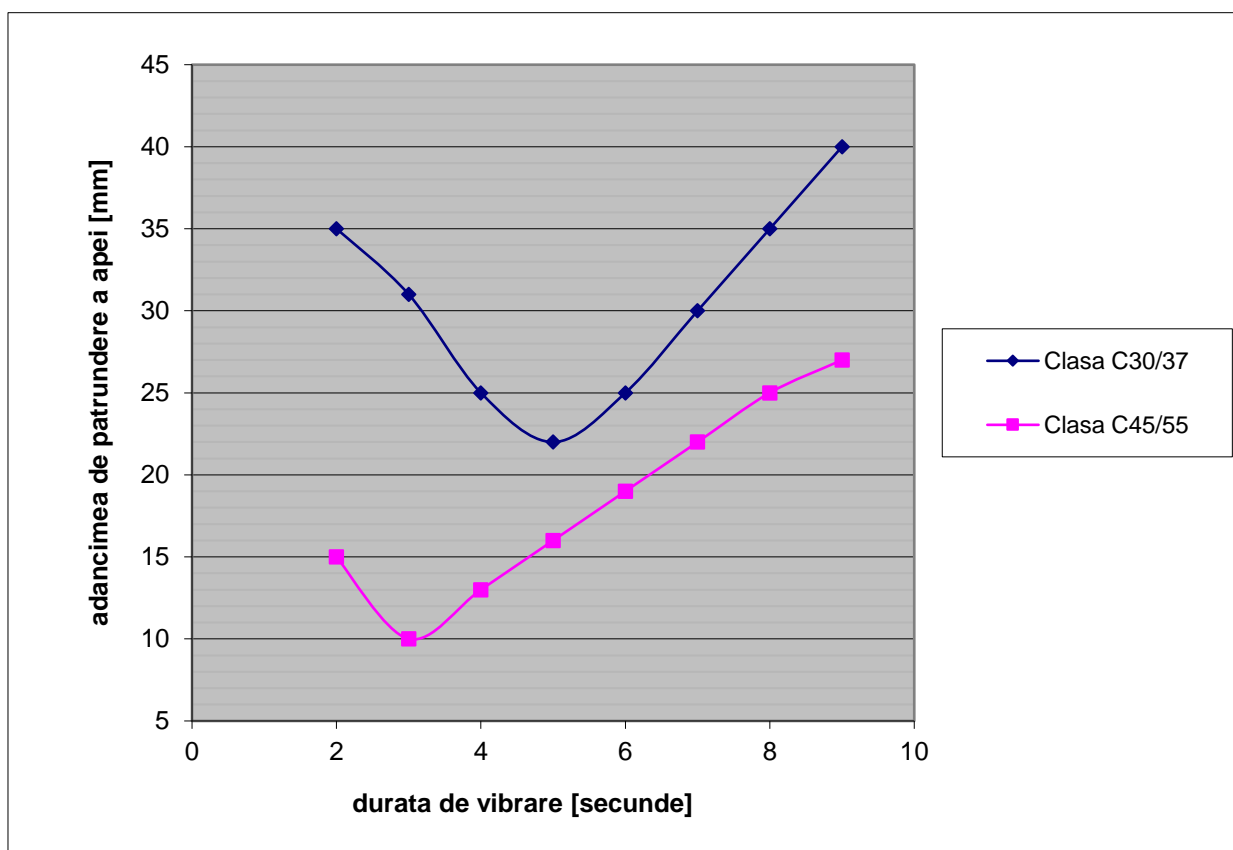


Fig. IV.6.3. Reprezentarea grafică a adâncimii de pătrundere a apei în cuburile de beton

Concluzii:

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

- durata de malaxare mai mică decât optimă 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 IV.6.1. și IV.6.2.

Capitolul V

CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE

Rezultatele cercetărilor efectuate sintetizate în teză pot fi evidențiate prin 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 microscopice ale betonului, în regim de vibrare, prin următoarele mărimi fizice:

- rigiditate;
- vâscozitate dinamică;
- disipare internă a energiei;
- parametrii reologici.
- Caracterizarea betonului proaspăt în procesul de vibrare, poate fi structurată astfel:
 - parametrizarea procesului ondulatoriu, adică propagarea a undelor longitudinale și transversale (slabe) a stratului superficial;
 - parametrizarea procesului de compactare în masa betonului în scopul diminuării 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 ω care trebuie să fie în concordanță cu aria delimitată de bucla histerezis 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. Astfel, au fost fundamentate următoarele:
 - 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 corecpondue 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 histeretice în funcție de parametrii de vibrare A_1 , ω și de masa m_2 și constanta de amortizare c a betonului proaspăt
 - stabilirea duratei optime de malaxare pentru un amestec de beton vibrat la durata optimă de vibrare.
- Curbele parțial obținute pentru fiecare etapă experimentală în parte atât pentru malaxare cât și vibrare 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 vibrare, respectiv malaxare, rezultată pe baza legislațiilor comportării betonului proaspăt în procesul de vibrare atunci când durata optimă de malaxare a fost stabilită.

V.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 ω , masa betonului și coeficientul de amortizare vâscoasă a betonului;
- stabilirea ecuațiilor curbelor histeretice de forma unor elipse parametrizate prin pulsația ω la valori discrete $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ și trasarea curbelor histeretice 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.

V.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 excitație 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] Mihăilescu Șt., Goran V., Bratu P., Mașini de construcții, vol 3, Editura Tehnică, București, 1986;
- [2] Krakinovskii L.M., Osonovnie prințipi unificații vibroploșciadok. Vibraționnaia tehnica, Moskva, 1966;
- [3] 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;
- [4] L'Hermite R., Turon G., La vibration du beton frais. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Paris, 1948;
- [5] Desov A.E., Vibratora dlia betona, Mașghiz, 1949;
- [6] Petrukin L.P., Osnovî teorii glubinih vibratorov dlia oplotnenia betonîh smesei, Mașghiz, Moskva, 1953;
- [7] Dewar I.D., Some effects of prolonged agitation of concrete. Cement, Lime and Gravel, 38, no. 4 p.p. 121-8, London, april 1963;
- [10] Zarioiu (Pințoi) Maria Ramona. Analiza parametrică a procesului de compactare dinamică prin vibrații cu impact asupra performanțelor betonului proaspăt la punerea în operă. Autoreferatul tezei de doctorat, Galați 2015;
- [11] Bauman V.A., Bihovski I., Vibraționnie mașini I protesi v stroitelstve. Vîssaia Skola, Moskva, 1977;
- [12] Pințoi R., Bordos R. and Brăguță E. - „Vibration Effects in the Process of Dynamic Compaction of Fresh Concrete and Stabilized Earth”, in JOURNAL OF VIBRATION ENGINEERING & TECHNOLOGIES, Vol. 5, No. 3, June 2017;
- [13] Adrian Savulescu. Controlul vibrațiilor de răspuns la echipamentele tehnologice în regim dinamic de funcționare. Rezumatul tezei de doctorat, Galați 2016, 60p.;
- [15] Bratu P., Izolarea și amortizarea vibrațiilor la utilajele de construcții, București, 1982;
- [16] Bratu P., Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje, Editura Tehnică, București, 1990;
- [17] Bratu P., Gheorghe M., Beton autocompactant – cercetare (Prenormativă), Sinteza rezultatelor obținute, Contract nr. 435/2009;
- [18] Bratu P., Stabilirea ecuațiilor de mișcare pentru rigidul cu legături elastice, Academia Română „Studii și cercetări de mecanică aplicată”, nr. 2, 1993;
- [19] Bratu P., Vibrații mecanice – sisteme modelate liniar, Universitatea “Dunărea de Jos”, Galați, 1994;
- [20] Bratu P., Drăgan N., Vibrații mecanice – aplicații, Universitatea “Dunărea de Jos”, Galați, 1996;
- [21] Bratu P., Experimental correlations with calculus parameters for a dynamic system equipped with antiseismic elastomeric devices, în Article No.1 Romanian Journal of Transport Infrastructure, Vol.3, 2014, No.2, pag. 1-11;
- [22] Năstac S., Analiza numerică cu aplicații în inginerie, Editura Impuls, București, România, 2004;
- [23] Debeleac C., Interacțiunea echipament - mediu și modelare dinamică, Editura Galați University Press - GUP, ISBN 978-606-696-022-9, 2015;

- [24] Năstac S., *Introducere în Teoria Vibrațiilor Neliniare și Aleatoare*, Editura Impuls, București, 2014;
- [26] Carmen Debeleac and Silviu Nastac, *Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process*, PAMM, (14)1, Special Issue: 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Erlangen 2014; Editors: P. Steinmann and G. Leugering, Volume 14, Issue 1, pages 749–750, December 2014, Article first published online: 22 DEC 2014;
- [27] Desov A.E., *Wave reflection and resonance phenomena during the three-dimensional vibrating concrete mixes*. Traducere din limba rusă, National Lending Library for Science and Technology, Boston, 1971;
- [33] Georgescu A., Ionescu M., Stancu M., *Studiu privind determinarea tipurilor optime de vibratoare pentru compactarea betoanelor puse în operă*. Referat INCERC 7277/1975, București;
- [35] Goldstein B.G., Petrunkin L.P., *Glubinie vibratorii dlia uplotnenia beton*. Mașinostroenie, Moskva, 1966;
- [36] Goldstein B.G., Sabodiant A.M., *Radius deistvia glubinîh vibratorov*. Res. Stroitelnîe i dorojnîe mașinî nr. 9, 1968;
- [37] Green H., Roberts A.B., *A note on the effect of frequency on the behaviour of fresh concrete during vibration*, Magazine of concrete research, vol. 15, nr. 14, July, 1963;
- [43] Debeleac C., Axinti G., *Sinteze de mecanică newtoniană cu aplicații*. Vol. II Cinematica, Editura Galați University Press - GUP, ISBN 978-606-696-023-6, ISBN 978-606-696-025-0, 2015;
- [52] Moldovan V., *Aditivi în betoane*. Editura Tehnică, București, 1978;
- [58] Peicu R.A., *Utilaje și procese tehnologice din industria prefabricatelor*. Institutul de Construcții, București, 1975;
- [59] Petrukin L.P., *Glubinîe vibratorii dlia uplotnenia betona*, Mașghiz, Moskva, 1952;
- [60] Pavel Cr., *Referat doctorat: absorbatorii dinamici de vibrații*, ICB, 1991;
- [61] Poterașu V., Secu Al., Popescu D., Neagu G., *Modele de optimizare și identificare a sistemelor vibrante*, Editura „Glasul Bucovinei”, Iași, 1995;
- [62] Poterașu V., Neagu G., Bejan L., *Identificarea parametrilor sistemelor vibrante*, Institutul Politehnic Iași, vol. 9, 1998;
- [63] Popescu P., Donici T., *Mașini de construcții*, Editura Tehnică, București, 1966;
- [64] Rebut P., *Ghid practic pentru vibrarea betoanelor (traducere din limba franceză)*. Editura Tehnică, București, 1967;
- [65] Reiner M., *Rheologie theorique*. Dunod, Oaris, 1955;
- [68] Silaș Gh., Brindeu L., Grosanu I., Cioara T., Pitzer I., Vazorca B., *Studiul comportării dinamice a unui vibrator de adâncime pentru lucrări de construcții*. Comunicare la conferința „Vibrații în construcții de mașină”, Timișoara, 1975;
- [73] 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;
- [79] Viespescu D., Moscovici P., *Vibrarea intensivă și prelungită a betonului*. Revista Construcțiilor și Materialelor de Construcții, București, nr. 2-3/1965;
- [80] Viespescu D., Platon M., Cambureanu A., Popescu P., *Tehnologia lucrărilor de beton*

- precomprimat. Editura Tehnică, București, 1979;
- [85] Zubanov M.P., Vibraționnîe mașini dlia uplotnenia betonniñ amesei i grunta. Moskva, 1964;
- [92] Pințoi R., Îmbunătățirea calității betoanelor prin aplicarea cerințelor Uniunii Europene publicată în Revista CONSTRUCȚIILOR – iulie 2005;
- [93] Pințoi R., Încercarea materialelor de construcții în conformitate cu standardele europene publicată în Revista CONSTRUCȚIILOR – septembrie 2005;
- [94] Pințoi R., Evaluarea incertitudinii de măsurare în laboratoarele de încercări publicată la conferința cu participare internațională – CONTEL 2007;
- [95] Pințoi R., Atestarea conformității betonului proaspăt cu impact asupra elementelor structurale – Clowne Plaza 2009;
- [96] Pințoi R., Studiul agregatelor stabilizate cu polimeri – Universitatea Tehnică de Construcții 2009;
- [97] Pințoi R., Evaluarea comparativă a rezistențelor la smulgere pentru epruvetele din oțel beton realizate sub formă de bare sau obținute din colaci prin îndreptare – 2009;
- [98] Pințoi R., Atestarea conformității agregatelor minerale pentru aplicarea marcajului CE – Congresul Național de Drumuri și Poduri 2010;
- [99] Pințoi R., Implementarea noilor standarde de încercare a betonului întărit la îngheț-dezghet – CONTEL 2010;
- [100] Pințoi R., Analiza abaterilor semnificative ale parametrilor de sortare a agregatelor minerale, cauzele acestora și influența directă asupra reducerii performanțelor produselor finale – Simpozion SIKAKO 2010;
- [101] Pințoi R., Self-compacting concrete with flue dust – Romanian Journal of Materials– 2011, volume 3;
- [102] Pințoi R., Requirements to achieve the performance parameters for mineral aggregates graininess when producing self-compacting concrete – CONSILOX Symposium 2012;
- [103] Pințoi R., The behaviour of mineral aggregates stabilized with polymers to achieve road layers CONSILOX Symposium 2012;
- [104] Pințoi R., Establishing the optimum duration of green concrete allegation depending on the achievement of physical homogenization by real-time monitoring the technological processing – CONSILOX Symposium 2012;
- [105] Pințoi R., Influence on the blades' self-excited vibratory movement at the same time with the turning movement when decreasing the allegation duration of green concrete – The 35th International Conference on Solid Mechanics Acoustics and Vibrations – Cluj Napoca 2012;
- [106] Pințoi R., Comparative parameters on the specific performances of self-compacting concrete in two versions with additions – The 6th International Scientific and Technological Conference – Chișinău 2012;
- [107] Pințoi R., Corelația procesului de compactare prin vibrare a betonului cu disiparea internă a energiei – EMING 2013, Universitatea Eftimie Murgu, Reșița;
- [108] Pințoi R., Evaluation of the rheological parameters modification of concrete vibrating compaction by dynamic methods – Maroc 2013;
- [109] Pințoi R., Model reologic pentru evaluarea compactării dinamice prin vibrații staționare a betonului proaspăt, 21th ICSV, Beijing, China, 13-17.07.2014;

- [110] Piñto R., Dependence of the Concrete Strength on the Duration of the Compaction by Vibration Process, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, nr. 1/2015;
- [111] Piñto R., Predictable correlations between the effect of vibratory compaction, the internal energy dissipation and the vibration time of fresh concrete, ICSV22, Florence, Italy, 12-16 July 2015;
- [112] Piñto R., Metode de încercare pentru evaluarea performanțelor betonului și a amestecurilor asfaltice pentru punerea în operă, ASTR 2015;
- [113] Bratu P., Analiza comportării dinamice a dispozitivelor antiseismice schematizate ca modele reologice complexe, Buletinul AGIR, Supliment 2/2015;
- [114] Piñto R., Determinări experimentale pentru evaluarea răspunsului dinamic al betonului proaspăt în procesul de compactare, CONSILOX 2016;
- [115] Bratu P., Brăguță E., Performanțe de rezistență a pământurilor stabilizate cu enzime, în procesul de compactare prin vibrații, CONSILOX 2016;
- [116] Piñto R., Evaluarea duratei de vibrare la betoanele proaspete compactate dinamic la punerea în operă, Conferința IMSAV - Brașov 2016;
- [117] Piñto R., Arsene M., Metode de încercare pentru evaluarea performanțelor betonului și a amestecurilor asfaltice pentru punerea în operă, Lucrările celei de-a X-a ediții a Conferinței anuale a ASTR, 2015, pag. 356-362;
- [118] Piñto R., The analysis of concrete rheological characteristics behaviour, în Fiabilitate și Durabilitate - Fiability & Durability No 1/2013, Editura „Academica Brâncuși”, Târgu Jiu, ISSN 1844 – 640X, pag. 90-97;
- [119] Bălan St., Elemente de mecanică teoretică. Editura didactică și pedagogică, București, 1975;
- [124] Debeleac, C., Axinti, G., Sinteze de mecanică newtoniană cu aplicații. Vol. III Dinamica, Editura Galați University Press - GUP, ISBN 978-606-696-023-6, ISBN 978-606-696-026-7, 2015;
- [125] Carmen Debeleac, Silviu Nastac, On The Influence Of The Working Tools Shape In The Mixing Proces, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle XIV, Mechanical Engineering, 2011 Issue Vol 2, pp.49-54;

STANDARDE ȘI NORMATIVE

- [139] SR 3518:2009 - Încercări pe betoane. Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin măsurarea variației rezistenței la compresiune și/sau modulului de elasticitate dinamic relativ;
- [140] NE 012-1:2007 – Cod de practică pentru executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 1: Producerea betonului;
- [141] NE 012-2:2012 – Normativ pentru producerea betonului și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 2 : executarea lucrărilor din beton;
- [142] SR EN 12620+A1:2008 – Agregate pentru Betoane;
- [143] SR EN 933-1:2012 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 1: Determinarea granulozității - Analiza granulometrică prin cernere;
- [146] SR EN 933-8:2012 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 8: Evaluarea părților fine. Determinarea echivalentului de nisip;

- [147] SR EN 1097-1:2011 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și fizice ale agregatelor. Partea 1: Determinarea rezistenței la uzură (micro-Deval);
- [148] SR EN 1097-2:2010 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și fizice ale agregatelor. Partea 2: Metode pentru determinarea rezistenței la sfărâmare;
- [149] SR EN 1097-3:2002 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și fizice ale agregatelor. Partea 3: Metode pentru determinarea masei volumice în vrac și a porozității intergranulare;
- [150] SR EN 1097-6:2013 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și fizice ale agregatelor. Partea 6: Determinarea masei reale și a coeficientului de absorbție a apei;
- [151] SR EN 1367-1:2007 - Încercări pentru determinarea caracteristicilor termice și de alterabilitate ale agregatelor. Partea 1: Determinarea rezistenței la îngheț-dezgeț;
- [152] SR EN 206-1:2002 - Beton. Partea 1: Specificație, performanță, producție și conformitate;
- [153] SR EN 197-1:2011 - Ciment. Partea 1. Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale;

SITE-URI INTERNET, CATALOAGE DE PRODUSE

- [160] ***, <https://www.scribd.com/document/121200179/Imbracaminti-rutiere-rigide>, accesat la 23.02.2018.
- [161] ***, <https://www.scribd.com/document/80111104/C155-89-Normativ-privind-prepararea-%C5%9Fi-utilizarea-betoanelor-u%C5%9Foare>, accesat la 14.03.2018.
- [162] ***, <http://www.creeaza.com/tehnologie/constructii/Rolul-componentelor-si-influen278.php>, accesat la 14.03.2018.
- [163] ***, <https://www.holcim.ro/ro/produse-si-servicii/produse/ciment/ciment-vrac>, accesat la 20.03.2018.
- [164] ***, <https://www.scribd.com/document/354677156/PTL-Determinarea-granulozitatii-si-a-continutului-de-parti-fine-filer>, accesat la 25.03.2018.
- [165] ***, <https://vdocuments.site/documents/determinare-coeficient-de-aplatizare-agregate.html>, accesat la 25.03.2018.
- [166] ***, <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02473784>, accesat la 28.03.2018.
- [167] ***, <https://www.slideserve.com/senta/fenomenul-de-interac-iune-seismic-teren-structur>, accesat la 28.03.2018.