

INFLUENȚA RIGIDITĂȚII SISTEMULUI BRAȚ- PALETĂ LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, ASUPRA RANDAMENTULUI PROCESULUI DE AMESTECARE

THE INFLUENCE OF THE ARM-BLADE SYSTEM RIGIDITY AT VERTICAL AXIS MIXERS, ON THE THE KNEADING PROCESS PERFORMANCE

Virgil ENESCU¹, Cristian PAVEL², Polidor BRATU³

¹Universitatea Tehnică de Construcții București, Calea Plevnei 59, București, România, e-mail :virgil-constantin.enescu@phd.utcb.ro

²Universitatea Tehnică de Construcții București, Calea Plevnei 59, București, România, e-mail: cpcristianpavel@gmail.com

³Institutul de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții- ICECON S.A., Șoseaua Pantelimon 266, București, România, e-mail: icecon@icecon.ro

Rezumat. Gradul de omogenizare al betonului preparat reprezintă cerința principală de performanță a malaxoarelor cu ax vertical. Procesul de omogenizare a amestecului preparat este influențat de mișcarea de auto-vibrație a paletelor ca urmare a încovoierii alternative a brațului de malaxor, modelat ca o bară elastică încastrată în rotor. În vederea modelării matematice a procesului de amestecare, se consideră cazurile unor malaxoare cu ax vertical cu capacități de 0,5 și 2,0 mc, pentru care s-au determinat forțele de încovoiere, pulsațiile proprii ale paletelor, constantele elastic, precum și amplitudinile mișcării oscilatorii. Compararea rezultatelor obținute la cele două malaxoare are ca scop scoaterea în evidență a influenței rigidității sistemului braț-paletă, asupra parametrilor mișcării de auto-vibrație, implicit asupra randamentului de omogenizare a amestecului preparat. Lucrarea își propune deci o analiză a parametrilor mișcării de auto-vibrație a sistemului braț-paletă pentru malaxoare cu ax vertical de diferite capacități, în scopul eficientizării procesului de amestecare, luând în considerare și eficiența energetică a fiecărui malaxor studiat.

Cuvinte cheie: malaxor, bară elastică, auto-vibrație, paletă, omogenizare

Abstract. The homogenization degree of the prepared concrete is the main performance requirement of vertical axis mixers. The homogenization process of the prepared mixture is influenced by the blades self-vibration movement as a result of the alternating bending of the mixer arm, modeled as an embedded elastic bar. In order to mathematically model of the mixing process, the cases of vertical axis mixers with capacities of 0.5 and 2.0 mc are considered, for which the bending forces, the blades own pulsations, the elastic constants as well as the oscillatory movement amplitudes were determined. The comparison of the results obtained with the two mixers aims to highlight the influence of the arm-blade system stiffness, on the parameters of the blades vibration movement, implicitly on the homogenization efficiency of the prepared mixture. The paper therefore proposes an analysis of the self-vibration movement parameters of the arm-blade system for vertical axis mixers of different capacities, in order to make the kneading process more efficient, taking into account the energy efficiency of each studied mixer.

Keywords: mixer, elastic bar, self-vibration, blade, homogenization

1. INTRODUCERE

Pe durata procesului de amestecare a materialelor la malaxoarele cu ax vertical, mișcările sistemelor braț-paletă pot fi considerate ca având un singur grad de libertate și pot fi asimilate unor vibrații libere ale sistemelor cu amortizare vâscoasă supuse la excitații armonice [1]. Brațul de malaxor poate fi asimilat cu o grindă încastrată supusă acțiunii de încovoiere, încovoiere produsă de masele de beton aflate în fața paletelor și a porțiunii de braț din interiorul betonului, la care se adaugă masele proprii ale paletelor și ale porțiunii respective de braț. Asupra fiecărui sistem braț-paletă aflat în mișcare de auto-vibrație, acționează forța armonică $F_i = F_{0i} \sin \omega t$, în care F_{0i} reprezintă amplitudinea forței (forța maximă de încovoiere) pentru paleta i , iar ω reprezintă pulsația sistemului sub efectul forței armonice [1,7,9,10].

Procesul de amestecare a betonului poate fi modelat matematic prin determinarea maselor și forțelor de încovoiere, a pulsațiilor proprii ale paletelor, a constantelor elastice și a amplitudinilor mișcării de oscilație, pentru fiecare sistem braț-paletă a malaxoarelor studiate. Eficiența omogenizării amestecului se consideră cu atât mai bună cu cât pulsațiile proprii ale paletelor au valori mai apropiate de pulsația de excitație (a rotorului) și cu cât amplitudinile mișcării sunt mai mari. Gradul de rigiditate al sistemului braț-paletă poate influența în mare măsură randamentul omogenizării, rigiditatea superioară a sistemului asigurând o fiabilitate sporită la malaxarea betoanelor cu grad ridicat de consistență, în timp ce elasticitatea superioară conduce la o creștere a performanțelor de amestecare în cazul betoanelor fluide [9,10].

Gradul de performanță la omogenizarea amestecului preparat pentru cele două malaxoare studiate, este evaluat ținând seama de eficiența efectivă de amestecare și de eficiența energetică pentru fiecare caz în parte, luând în considerare și duratele de malaxare recomandate.

2. MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL

2.1 DETERMINAREA MASELOR ȘI SĂGETILOR DE ÎNCOVOIERE LA SISTEMELE BRAȚ-PALETĂ

Pentru malaxorul cu ax vertical cu palete, prezentat schematic în figura 1, se consideră sistemul braț-paletă ca o grindă încastrată și supusă încovoierii cu forța compusă F (figura 2), rezultată ca efect al maselor de beton aflate în fața paletelor și a porțiunii de braț din interiorul betonului, la care se adaugă masele proprii ale paletelor și ale porțiunii respective de braț [2-4].

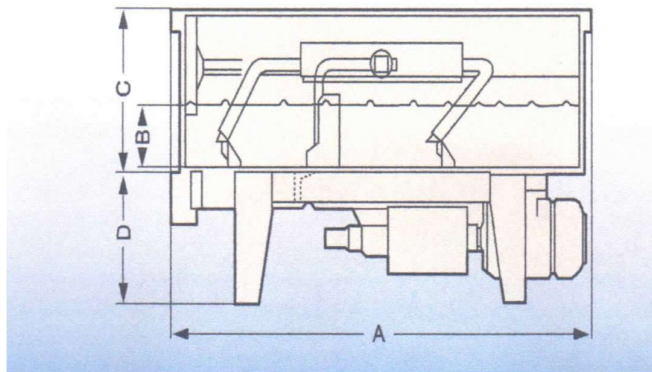


Figura 1

INFLUENȚA RIGIDITĂȚII SISTEMULUI BRAȚ- PALETĂ LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, ASUPRA RANDAMENTULUI PROCESULUI DE AMESTECARE

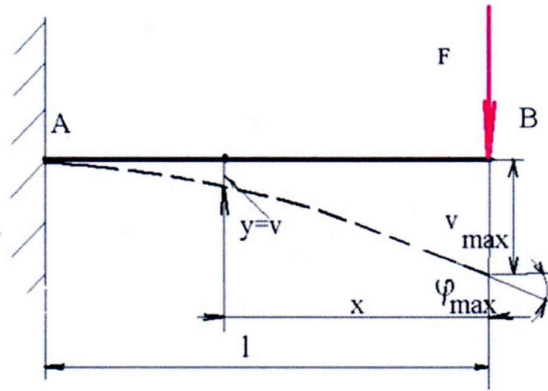


Figura 2

Masa totală de încovoiere a sistemului braț –paletă la malaxorul din figura 1 se poate determina cu relația: $M_1 = m_p + m_b + m_1 + m_2$, (1), în care:

- m_p este masa paletei;
- m_b este masa porțiunii de braț introdusă în material;
- m_1 reprezintă masa de beton aflată în fața paletei, în timpul procesului de malaxare;
- m_2 reprezintă masa de beton aflată în fața brațului paletei în timpul procesului de malaxare.

Relațiile de calcul pentru determinarea celor patru mase sunt următoarele:

$$m_p = q_m \times S_p \times g_p \quad (2),$$

în care S_p și g_p reprezintă suprafața și grosimea paletei, iar q_m densitatea oțelului, $q_m = 7,85 \text{ kg/dm}^3$

$$m_b = (h_m - h_p) \times \frac{\pi d^2}{4} \times q_m \quad (3),$$

în care: $h_m = B$, este înălțimea stratului de beton din malaxor, h_p este înălțimea paletei de malaxor iar d este diametrul brațului de malaxor;

$$m_1 = S_p \times q_b \times 2 \pi \times R_i \quad (4),$$

în care: q_b este densitatea betonului în stare proapătă, iar R_i este raza paletei i; $q_b = 2200 \text{ kg/m}^3$

$$m_2 = (h_m - h_p) \times \frac{\pi d}{2} \times 2 \pi \times R_i \times q_b \quad (5)$$

Pentru cazul sistemul braț-paletă considerat ca fiind o grindă încastrată de lungime l , supusă acțiunii forței F produsă de masele de încovoiere (figura 2), săgeata maximă, se exprimă prin relația:

$$v_{max} = f = \frac{Fl^3}{3EI_z} \quad (6) \quad [2-4]$$

2.2 DETERMINAREA PULSAȚIILOR PROPRII ALE PALETELOR, A CONSTANTELOR ELASTICE ALE SISTEMULUI BRAȚ-PALETĂ ȘI A AMPLITUDINILOR MIȘCĂRII

Forța perturbatoare: $F = mg = kf \quad (7)$

Constanta elastică a sistemului este $k = m\omega^2 \quad (8) \quad [1,7, 9,10]$

Din relațiile (6), (7) și (8) rezultă relația pentru pulsație:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{f}} = \sqrt{\frac{3EI}{ml^3}} \quad (9),$$

în care : m este masa totală de încovoiere iar l= R (raza) pentru fiecare paletă în parte, E este modulul de elasticitate al oțelului $E= 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, iar $I=I_z$ este modulul de rezistență axial, determinat cu relația:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (10) \quad [2-4]$$

Relația de calcul a amplitudinii pentru fiecare paletă este următoarea :

$$A_1 = \frac{F_{01}}{\sqrt{(k_1 - m_1 \omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (11) \quad [1]$$

Pentru fiecare paletă se consideră forțele armonice $F_i = F_{0i} \sin \omega t$, iar amplitudinea forței pentru paleta i, este $F_{0i} = M_i g$, în care M_i reprezintă masa totală de încovoiere.

Constantele elastice pentru fiecare paletă sunt date de relația:

$$k_i = M_i \chi \omega_i^2 \quad (12),$$

În relația (11) constanta $c = 2\xi\sqrt{km}$ (13), în care $\xi = 0,2$ este factorul de amortizare a mișcării [1].

3. CAZUL MALAXORULUI CU AX VERTICAL DE 0,5 MC CAPACITATE

Caracteristici tehnice pentru malaxorul prezentat în figura 3[11]: capacitatea utilă 0,5 mc, productivitatea 30 mc/h, puterea motorului 22 kW, turația rotorului 26,2 rot/min, număr de palete 5 bucăți.

Caracteristici constructive și geometrice malaxor[11]:

- diametrul cuvei: $A = 2126 \text{ mm}$;
 - înălțimea cuvei: $C = 845 \text{ mm}$;
 - razele paletelor: $R_1 = 855 \text{ mm}$; $R_2 = 828 \text{ mm}$; $R_3 = 795 \text{ mm}$; $R_4 = 752 \text{ mm}$; $R_5 = 708 \text{ mm}$;

- diametrul brațului de malaxor: $d = 38 \text{ mm}$;
 - modulul de rezistență axial: $I = 10,23 \times 10^4 \text{ mm}^4$;
 - suprafața paletei: $S_p = 26,4 \text{ cm} \times 12,5 \text{ cm} = 330 \text{ cm}^2$;
 - înălțimea stratului de material: $h_m = B = 275 \text{ mm}$;
 - masa paletei calculată cu relația (2), considerând $g_p = 2 \text{ cm}$, $m_p = 5,2 \text{ kg}$;
 - masa brațului calculată cu relația (3) $m_b = 1,33 \text{ kg}$;

Pulsația de excitație a sistemului (a rotorului) este: $\omega_r = \frac{\pi n_r}{30}$ din care rezultă $\omega_r = 2,74 \text{ rad/s}$.

Eficiența energetică a malaxorului de 0,5 mc, definită ca raport între puterea necesară motorului de acționare și productivitatea de beton preparat este [8]:

$$C_{ef} = P_m / P_{th} = 22/30 = 0,73 \text{ kWh/mc}$$

Durata de malaxare recomandată [8,11]: 30 secunde

INFLUENȚA RIGIDITĂȚII SISTEMULUI BRAȚ- PALETĂ LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, ASUPRA RANDAMENTULUI PROCESULUI DE AMESTECARE

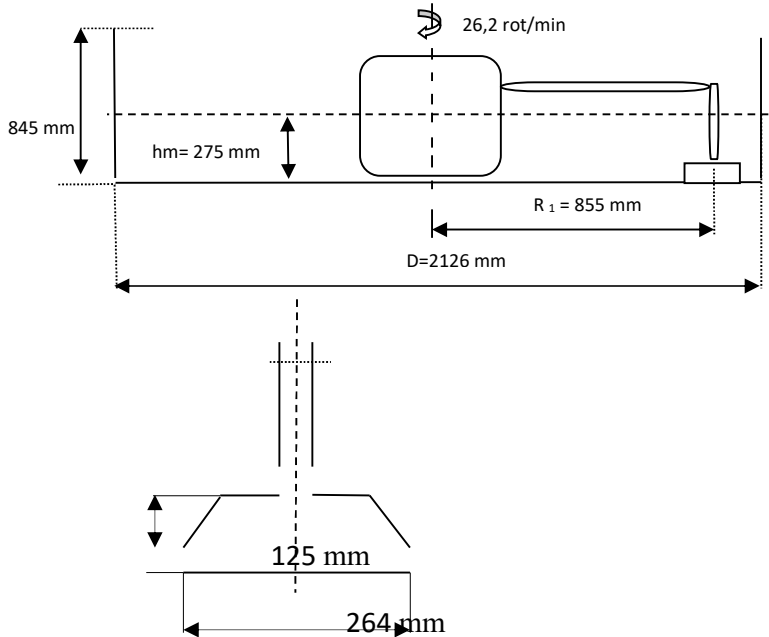


Figura 3

Aplicând relațiile (1)-(13) pentru malaxorul cu ax vertical de 0,5 mc capacitate, pentru determinarea parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor, obținem valorile din tabelul 1. Valorile amplitudinii s-au determinat pentru valoarea pulsației egală cu pulsația proprie a fiecărei palete în parte.

Tabelul 1. Valorile parametrilor pentru sistemul braț-paletă la malaxorul de 0,5 mc

Nr. paletă	Masa M_i (kg)	Pulsația proprie ω_i (rad/s)	Constanta elastică a sistemului k_i (N/m)	Amplitudinea A_i (m)
1	502,06	14,36	103640	0,12
2	486,4	15,29	113712	0,10
3	467,3	16,61	128919	0,09
4	442,4	18,52	151725	0,07
5	416,8	20,87	181543	0,05

4. CAZUL MALAXORULUI CU AX VERTICAL DE 2,0 MC CAPACITATE

Caracteristici tehnice pentru malaxorul prezentat în figura 4[11]: capacitatea utilă 2,0 mc, productivitatea 90 mc/h, puterea motorului 75 kW, turația rotorului 20,7 rot/min, număr de palete 5 bucăți.

Caracteristici constructive și geometrice malaxor[11]:

- diametrul cuvei : $A = 3242$ mm;
 - înălțimea cuvei : $C = 973$ mm;
 - razele paletelor: $R_1 = 1360$ mm; $R_2 = 1244$ mm; $R_3 = 1118$ mm; $R_4 = 1010$ mm; $R_5 = 888$ mm;
 - diametrul brațului de malaxor: $d = 56$ mm;
 - modulul de rezistență axial: $I = 48,25 \times 10^4$ mm⁴;
 - suprafața paletei: $S_p = 27$ cm x 13 cm = 351 cm²;
 - înălțimea stratului de material: $h_m = B = 460$ mm;
 - masa paletei calculată cu relația (2), considerând $g_p = 2,2$ cm, $m_p = 6$ kg.
 - masa brațului calculată cu relația (3), $m_b = 6,37$ kg
- Pulsăția de excitație a sistemului (a rotorului) este: $\omega_r = \frac{\pi n_r}{30}$, din care rezultă $\omega_r = 2,17$ rad/s.

Eficiența energetică a malaxorului de 2,0 mc[8]:

$$C_{ef} = P_m / P_{th} = 75/90 = 0,83 \text{ kWh/mc}$$

Durata de malaxare recomandată[8,11]: 30 secunde

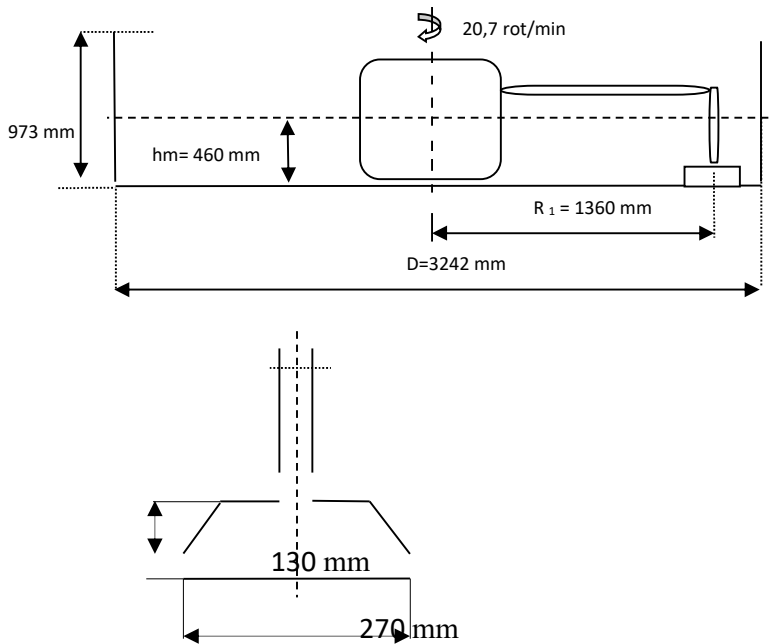


Figura 4

Aplicând relațiile (1) - (13) pentru malaxorul de 2,0 mc capacitate, pentru determinarea parametrilor mișcării de auto-vibrație, obținem valorile din tabelul 2. Valorile amplitudinii s-au determinat pentru valoarea pulsăției egală cu pulsăția proprie a fiecărei paletă în parte.

INFLUENȚA RIGIDITĂȚII SISTEMULUI BRAȚ- PALETĂ LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, ASUPRA RANDAMENTULUI PROCESULUI DE AMESTECARE

Tabelul 2. Valorile parametrilor pentru sistemul braț-paletă la malaxorul de 2,0 mc

Nr. paletă	Masa M_i (kg)	Pulsația proprie ω_i (rad/s)	Constanta elastică a sistemului k_i (N/m)	Amplitudinea A_i (m)
1	1217,05	9,96	120728	0,24
2	1114,3	11,90	157796	0,17
3	1002,7	14,73	217508	0,11
4	907,03	18,04	295125	0,07
5	798,9	23,31	434168	0,04

5. CONCLUZII

În conformitate cu rezultatele prezentate în tabelele 1-2 și luând în considerare eficiența energetică a malaxoarelor studiate, se poate concluziona că malaxorul de volum mai mare prezintă valori superioare ale parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor, având în același timp și o eficiență energetică ceva mai scăzută, în comparație cu malaxorul de volum mai mic, pentru aceeași durată de malaxare.

Pulsațiile proprii ale paletelor 1 și 2 situate mai departe de rotor, sunt mai apropiate valoric de pulsația de excitație la malaxorul de volum 2,0 mc, în comparație cu cele de la malaxorul de volum 0,5 mc. Amplitudinile paletelor 3-5 pentru cele două malaxoare au valori apropiate, iar amplitudinile paletelor 1 și 2 la malaxorul de 2,0 mc sunt mai mari decât cele similare de la malaxorul de 0,5 mc, ceea ce conduce la concluzia că materialul este mai bine omogenizat în cazul malaxorului de volum superior. În condițiile unui randament sporit la amestecare, durata recomandată de malaxare la aceeași clasă de beton s-ar putea reduce la malaxorul de volum 2,0 mc în comparație cu cea de la malaxorul de 0,5 mc, îmbunătățind eficiența energetică a acestuia.

Valorile obținute pentru parametrii celor două malaxoare le recomandă în condiții de consum energetic moderat, pentru prepararea betoanelor de ciment de uz general, cu diferite clase de consistență, malaxorul de capacitate 2,0 mc putând fi utilizat cu randament sporit și la amestecarea betoanelor cu destinații speciale.

BIBLIOGRAFIE

1. **Polidor Bratu**, *Analiza structurilor elastice. Comportarea la acțiuni statice și dinamice*, Editura Impuls, București 2011
2. **Polidor Bratu**, *Analiza dinamică a echipamentelor cu arbori elastici*, Universitatea “Dunărea de Jos” Galați, 2001
3. **Ungureanu Ion, Ispas Bucura, Constantinescu Emil**, *Rezistența Materialelor I (curs)*, Universitatea Tehnică de Construcții București, 1995
4. **Andreescu Indira, Mocanu Ștefan**, *Compendiu de Rezistența Materialelor (curs)*, Editura Matrix Rom, București, 2005
5. **Polidor Bratu**, *Multibody System with Elastic Connections for Dynamic Modeling of Compactor Vibratory Rollers*, *Symmetry* 2020
6. **Polidor Bratu, Cornelia Dobrescu**, *Dynamic Response of Zener-Modelled Linearly Viscoelastic Systems under Harmonic Excitation*, *Symmetry* 2019

7. Polidor Bratu, Andrei Buruga, Oleg Chilari, Adrian Ion Ciocodeiu, Ionel Oprea, *Evaluation of the Linear Viscoelastic Force for a Dynamic System (m, c, k) Excited with a Rotating Force*, Romanian Journal of Acoustics and Vibration. 16, 1 (Sep. 2019), 39-46

8. Virgil Enescu (2020), *Studiu comparativ al sistemelor de malaxare, referitor la domeniile de utilizare și performanțele de amestecare, cu impact direct asupra omogenității betonului și eficienței energetice a malaxării*, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată- SMTA, nr. 3, Volumul 11/2020, Editura Matrix Rom

9. Virgil Enescu (2021) *Parameters variation of the vibration movement of the elastic arm-pallete system at the mixers with vertical axis, by modifying the stiffness in order to improve the homogenization process*, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, vol. 64, Issue 3, September 2021

10. Virgil Enescu (2021) *Parameters Variation of The Elastic Arm-Blade System Vibration Movement at The Planetary Mixers to Improve the Homogenization Process* Romanian Journal of Acoustics and Vibration. vol. 18, issue 2/2021, pp 133-138

11. Prospecte malaxoare cu ax vertical de 0,5 și 2,0 mc